Gants de protection

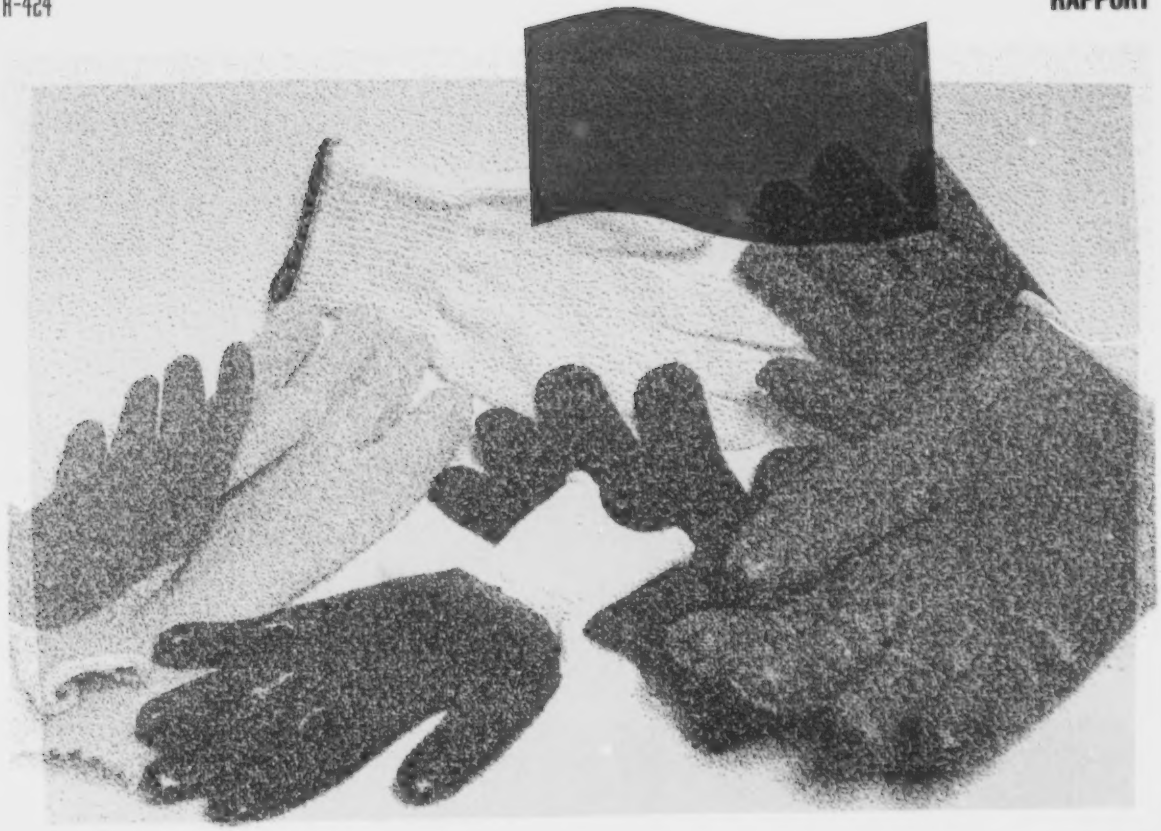
Étude sur la résistance des gants aux agresseurs mécaniques multiples

ÉTUDES ET RECHERCHES

Toan Vu-Khanh
Thi Bich Nga Vu
C. Thang Nguyen
Jaime Lara

R-424

RAPPORT



irsst

105-06422/

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES
travaillent pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, juillet 2005

ÉTUDES ET RECHERCHES

Gants de protection

Étude sur la résistance des gants aux agresseurs mécaniques multiples

Toan Vu-Khanh, Thi Bich Nga Vu et C. Thang Nguyen
École de technologie supérieure

Jaime Lara
Sécurité-ingénierie, IRSST

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

L'objectif principal de ce projet était d'étudier les aspects fondamentaux reliés au comportement des matériaux de protection vis-à-vis des agresseurs mécaniques multiples comportant la coupure et la perforation. Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettra aux fabricants de gants et de vêtements de protection de développer des nouveaux matériaux plus performants. Comme point de départ, des études très fouillées concernant les phénomènes de coupure et de perforation, traitées comme des sujets de recherche indépendants, ont été réalisées. Cette étape était primordiale vu le peu d'information existante concernant les recherches sur les mécanismes de coupure et de perforation. L'absence de méthodes reconnues était la cause du peu de progrès observé dans le domaine du développement des matériaux de protection pour protéger les travailleurs par rapport aux agresseurs mécaniques, responsables de plus de 20 % de l'ensemble des lésions en milieu de travail. En l'absence de matériaux performants, les travailleurs doivent porter plus d'un gant à la fois, l'un par-dessus l'autre, pour se protéger contre des agresseurs multiples tels que coupures et perforations simultanées, qui sont les situations les plus retrouvées dans les milieux de travail.

Vu l'envergure du problème et le peu d'information existante, cette recherche a porté sur le développement des connaissances par rapport aux phénomènes de coupure et de perforation, lesquels sont traités dans ce rapport dans des sections distinctes.

En ce qui concerne la résistance à la coupure, jusqu'à la fin des années 90, il n'y avait pas d'information sur les propriétés des matériaux de protection par rapport à ce type de sollicitation. L'absence de méthode d'essai pour caractériser la performance des matériaux était la cause de ce manque d'information. Dans la pratique, la méthode la plus utilisée dans les milieux de travail reposait sur l'essai–erreur, pour chercher la meilleure protection aux agresseurs mécaniques et dans des applications demandant beaucoup de dextérité. La méthode développée à l'IRSST qui est maintenant reconnue internationalement dans les normes ASTM et ISO, est venue combler cette lacune et permet maintenant le développement de connaissances par rapport à ce phénomène.

Dans ce rapport, nous faisons état des connaissances développées dans cette recherche par rapport au phénomène de coupure. Nous avons limité les travaux aux matériaux les plus utilisés dans la fabrication des gants et des vêtements de protection, soit les caoutchoucs néoprène, nitrile et le caoutchouc naturel. L'étude a permis de mettre en évidence l'importance des coefficients de friction, issus des interactions entre la lame et le matériau, sur la résistance des matériaux à la coupure. Cette force peut être plusieurs fois plus élevée que la force normale appliquée pour provoquer la coupure du matériau. Plus la force de friction est élevée, plus la résistance des matériaux à la coupure sera élevée.

Une interprétation du phénomène de coupure du point de vue fondamental a été proposée et des calculs théoriques issus de cette interprétation ont permis d'établir les contributions des différentes forces intervenant dans le phénomène de coupure. Ces calculs ont été validés par des essais expérimentaux. Vu l'importance des coefficients de friction sur la résistance à la coupure, une étude sur l'effet de la déformation des matériaux intervenant lors de l'utilisation des gants ou les vêtements de protection (e.g. les gants lorsqu'on plie les doigts) a été réalisée. Il a été

démontré que la déformation des matériaux peut avoir un impact majeur sur la diminution de la résistance des matériaux à la coupure, qui est causée par la diminution de l'effet de friction. Il a été trouvé aussi que le même effet peut être observé lorsque les matériaux sont contaminés avec des lubrifiants.

En ce qui concerne la perforation, il existe plusieurs essais qu'utilisent des sondes de perforation de géométries différentes. Cependant, bien que ces essais servent à caractériser la résistance des matériaux à la perforation suivant le type de sonde utilisée, ils ne donnent aucune information sur les propriétés intrinsèques des matériaux. Dans cette étude, une analyse très détaillée sur l'effet des différents types de sondes coniques, cylindriques ainsi que des aiguilles médicales utilisées comme sonde, sur les mesures de perforation a été réalisée.

Une analyse détaillée du phénomène de perforation a été réalisée et une interprétation sur la contribution des forces en jeu et leur influence dans les résultats des tests de perforation pour les différents types de sondes, a été proposée. Il a été trouvé que les mesures réalisées avec des sondes coniques sont très affectées par les forces exercées par les matériaux sur les parois de l'extrémité conique de la sonde. Il a été aussi démontré que l'angle de la partie conique de la sonde a une très grande influence sur les mesures de perforation. Par contre, les sondes cylindriques avec des extrémités arrondies ou planes, ne sont pas affectées par ce type de problème, elles sont beaucoup plus faciles à fabriquer et les résultats sont beaucoup plus fiables.

En ce qui a trait aux aiguilles de type médical, utilisées comme sondes de perforation, il a été trouvé que le phénomène est complexe, dans lequel la coupure et la perforation sont combinées. L'effet du vieillissement des matériaux par la température qui provoque un durcissement de celui-ci avec perte de ses propriétés élastiques, a un effet inégal sur la résistance à la perforation selon le type de sonde utilisée. Les valeurs de résistance à la perforation augmentent avec le temps de vieillissement des caoutchoucs lorsque les tests sont réalisés avec des sondes cylindriques (arrondies ou planes), alors que la résistance diminue lorsqu'ils sont caractérisés avec des aiguilles médicales comme sonde de perforation.

Cette étude constituait l'étape initiale de recherches visant à explorer les phénomènes de coupure et de perforation. Auparavant, peu d'études avaient été réalisées à cause du manque de méthodes d'essai fiables pour caractériser les propriétés des matériaux de protection. Le développement des connaissances issues de cette recherche permettra dans un deuxième temps, de s'attaquer au sujet plus complexe qui est la question des risques simultanés coupure et perforation, qui a été le but visé par nos travaux.

TABLE DES MATIÈRES

Page

SOMMAIRE i

1. INTRODUCTION 1

2. ÉTUDE SUR LA COUPURE 3
   2.1 Partie expérimentale 4
      2.1.1 L'appareil de coupure 4
      2.1.2 Méthode de coupure en absence de friction avec glissement de la lame 6
      2.1.3 Coupure en absence de friction sans glissement de la lame (méthode Lake & Yeoh)[8] 8
      2.1.4 Caractérisation de la lame 8
      2.1.5 Matériaux 10
   2.2 Résultats 10
      2.2.1 L'effet du coefficient de friction 10
      2.2.2 L'énergie de coupe 12
      2.2.3 Analyse du phénomène de coupure 12
      2.2.4 Relation entre force de friction et force normale 14
      2.2.5 La coupure en absence de friction sans glissement de la lame 15
   2.3 Analyse du phénomène de coupure selon la méthode standard 17
      2.3.1 Analyse des forces en jeu 17
      2.3.2 Mécanisme de friction lors de la coupure par glissement 20
      2.3.3 Effet de précontrainte des matériaux sur la résistance à la coupure 26
      2.3.4 Effet de la contamination des matériaux 28
      2.3.5 L'effet de la vitesse du déplacement de la lame sur les résultats de tests de coupure 29
   2.4 Le vieillissement des matériaux. L'effet de la température et des radiations UV sur la résistance à la coupure 31
      2.4.1 Effet du vieillissement thermique 31
      2.4.2 Effet du vieillissement par des radiations UV 34
   2.5 Conclusion 35

3. ÉTUDE SUR LA PERFORATION 39
   3.1 Analyse des méthodes d'essai 40
   3.2 Analyse préliminaire de la mécanique de rupture des polymères 41
      3.2.1 Résistance théorique 41
   3.3 Approches rapportées dans la littérature sur la perforation de divers matériaux 43
      3.3.1 Perforation des blocs en caoutchouc 43
      3.3.2 La résistance à la perforation des géotextiles 44
      3.3.3 La résistance à la perforation des matériaux de protection 44
      3.3.4 La résistance des matériaux de protection aux sollicitations complexes 45
   3.4 Méthodologie de l'étude 46
      3.4.1 Objectifs et portée de l'étude proposée 46
   3.5 Partie expérimentale 46

TABLE DES MATIÈRES

Page

3.5.1 Les matériaux 46
3.5.2 Essais de perforation 46
3.5.2.1 Étude sur la résistance à la perforation 46
3.5.3 Essais mécaniques 48
3.5.3.1 Essai de déchirure 48
3.5.3.2 Essai de traction uniaxiale 49
3.5.3.3 Essai de traction biaxiale (essai de ballon) 49
3.6 RÉSULTATS 50
3.6.1 Résistances à la perforation 50
3.6.1.1 Test de perforation avec des sondes coniques 51
3.6.1.2 Test de perforation avec des sondes cylindriques à tête plane 52
3.6.1.3 Test de perforation avec des sondes cylindriques arrondies 56
3.6.1.4 Analyse des forces impliquées dans la perforation des matériaux ... 58
3.6.2 La résistance des matériaux à la perforation aux aiguilles médicales. Résultats préliminaires 61
3.6.2.1 Dégradation de la tête de l'aiguille 63
3.6.2.2 Calcul de l'énergie de rupture 63
3.6.3 Les effets d'environnement sur la résistance à la perforation : effets du vieillissement par la température 65
3.6.4 Effets du vieillissement sur la perforation dans le cas d'une sonde cylindrique 65
3.6.5 Effets du vieillissement sur la perforation mesurée avec des aiguilles médicales 67
3.7 CONCLUSION 68
3.8 Travaux futurs 70

4. RÉFÉRENCES 71

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Force de friction due au serrage du matériau sur la lame et à la force normale appliquée lors de la coupure du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, calculées selon l'équation 2.6 19
Tableau 2.2 Force d'adhérence F_{adh} calculée pour la coupure du néoprène, du nitrile et du caoutchouc naturel 22
Tableau 2.3 Comparaison des valeurs théoriques et des valeurs expérimentales de la force de friction résultant des charges normales appliquées sur le néoprène de 1,57 mm d'épaisseur 24
Tableau 2.4 Valeurs de force de rupture de liens d'adhésifs par élongation 25
Tableau 2.5 Valeurs théoriques et expérimentales de la force d'adhérence pour les différents types de caoutchoucs 26
Tableau 3.1 Comparaison de la contrainte à la rupture, la contrainte de traction uniaxiale et biaxiale comparées aux résultats des tests de perforation (entre parenthèses : déviation standard) 54
Tableau 3.2 Déformation d'ingénieur à la rupture et la déformation réelle en traction et biaxial comparées aux résultats des tests de perforation (entre parenthèses : déviation standard) 55
Tableau 3.3 Relation entre la tête de la sonde et le diamètre du disque de coupe 56
Tableau 3.4 Comparaison des résultats d'essais avec des sondes de perforation à tête plane et arrondies de 1,0 mm de diamètre avec leurs déviations standards 57
Tableau 3.5 Résultats des tests de perforation du néoprène 1,57 mm d'épaisseur avec différents diamètres d'aiguilles suivant les deux définitions décrites (déviation standard en parenthèses) 62
Tableau 3.6 Valeurs de l'énergie de la surface de rupture (en mJ/mm^2) 64
créées par une aiguille médicale (valeurs d'énergie) 64

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 2.1 Schéma décrivant le principe de la méthode de coupure 5
Figure 2.2 Version instrumentée du TDM-100 5
Figure 2.3 Support de lame incluant un capteur de force pour mesurer la force horizontale de friction 6
Figure 2.4 Principe de la méthode d'essai de coupure en absence de friction 7
Figure 2.5 Porte–échantillon pour les essais en absence de friction 7
Figure 2.6 Schéma du principe de la méthode coupure de Lake &Yeoh (à gauche) et photo du montage expérimental (à droite) 8
Figure 2.7 L'image du bord de lame magnifié 200 fois (a) et la représentation schématique de la géométrie de lame (b) 9
Figure 2.8 Microscope 2D de Mitutoyo servant à caractériser la géométrie de la lame 9
Figure 2.9 Force tangencielle en fonction du déplacement de la lame lors d'un test De coupure de néoprène de 1,57 mm d'épaisseur 10
Figure 2.10 Déplacement de la lame à la coupure en fonction de la force normale appliquée pour différentes épaisseurs de néoprène 11
Figure 2.11 Déplacement de la lame à la coupure en fonction de la force normale appliquée pour le nitrile 11
Figure 2.12 Énergie de coupure en fonction de la force normale appliquée 12
Figure 2.13 Force tangentielle avec une pénétration partiale de la lame dans du néoprène ..... 1,57 mm d'épaisseur (section 0-A, $F_N = 9N$; section A-B $F_N = 0$) 13
Figure 2.14 Force tangentielle due au glissement de la lame dans une section du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur déjà coupée 14
Figure 2.15 Force de friction maximale en fonction de la force normale appliquée pour différentes épaisseurs de néoprène 14
Figure 2.16 Force horizontale maximale en fonction de l'épaisseur du néoprène 15
Figure 2.17 Force de pénétration en fonction du déplacement de la lame 16
Figure 2.18 Énergie de coupure en fonction de l'énergie d'étirement du néoprène 1,57 mm d'épaisseur 17
Figure 2.19 Valeurs calculées des forces de friction dues à la force de serrage et à la force normale appliquée lors de la coupure du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur 20
Figure 2.20 Force maximale de friction en fonction de la force normale appliquée lors des tests de coupure des néoprènes de différentes épaisseurs 21
Figure 2.21 Force maximale de friction en fonction de la force normale appliquée lors des tests de coupure. Le tissu en fibre de verre a été utilisé comme exemple d'un matériau avec résistance à la coupure élevée et un faible coefficient de friction 21
Figure 2.22 Diagramme de la distribution des forces dues à la charge normale appliquée 22
Figure 2.23 Effet du pourcentage de déformation sur la force horizontale pour du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur 27
Figure 2.24 Effet du pourcentage de déformation sur le déplacement de la lame à la coupure pour une force normale appliquée de 5N pour le néoprène et de 2N pour le nitrile et le caoutchouc naturel 27
Figure 2.25 Effet de la friction sur la force horizontale pour des gants de néoprène de 0,61 mm d'épaisseur 28

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 2.26 Effet de la friction sur le déplacement maximal de la lame pour des gants de nitrile de 0,61 mm d'épaisseur 28
Figure 2.27 Effet de la vitesse de déplacement de la lame sur la distance à la coupure avec une force normale appliquée de 2N pour nitrile et le caoutchouc naturel et de 5N pour le néoprène 29
Figure 2.28 Déplacement de la lame en fonction de la force normale appliquée à différentes vitesses de déplacement de la lame, sur du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur 30
Figure 2.29 Force horizontale de friction en fonction de la force normale appliquée à différentes vitesses de déplacement de la lame, sur du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur 31
Figure 2.30 Effet de l'exposition du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à 140°C pendant 0, 48 et 96 heures sur l'allongement à la rupture 32
Figure 2.31 Effet de la température d'exposition pendant 96 heures du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, sur le déplacement de la lame à la coupure pour une force normale appliquée de 12 N 33
Figure 2.32 Effet de la température d'exposition pendant 96 heures du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur sur la force de friction maximale à la coupure avec une force normale de 12 N 33
Figure 2.33 Effet du temps de vieillissement du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à 100°C sur la force de friction maximale à la coupure avec une force normale appliquée de 5N 34
Figure 2.34 Effet du temps de vieillissement du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à 100°C sur la force de friction maximale à la coupure pour une force normale appliquée de 5 N 34
Figure 2.35 Effet du temps d'exposition à l'UV des néoprènes de 1,57 mm et 0,41 mm d'épaisseur sur le déplacement de la lame à la coupure. Les charges appliquées sont de 5 N et 2 N respectivement pour les néoprènes de 1,57 et 0,41 mm d'épaisseur 35
Figure 2.36 Effet du temps d'exposition à l'UV des néoprènes de 1,57 mm et 0,41 mm d'épaisseur sur la force de friction maximale à la coupure. Les charges appliquées sont de 5 N et 2 N respectivement pour les néoprènes de 1,57 et 0,41 mm d'épaisseur ... 35
Figure 3.1 a) Sonde de perforation utilisée dans ASTM F134 ; b) Aiguille médicale; c) Aiguille à tricoter; d) Couteau avec tête pointue 41
Figure 3.2 Essai de perforation sur un bloc en caoutchouc 43
Figure 3.3 La sonde de perforation et support d'échantillon selon la norme ASTM F1342 45
Figure 3.4 a) Montage d'essai de perforation b) Porte-échantillon 47
Figure 3.5 Sonde de perforation : sonde cylindrique : tête plane (a), tête arrondie (b), sonde conique : tête arrondie (c), tête plane (d) et aiguille médicale (e) 48
Figure 3.6 Échantillon d'essai « Trouser » : (a) État non déformé ; (b) État d'extension 48
Figure 3.7 Élongation mesurée par l'extensomètre laser 49
Figure 3.8 Schéma de l'essai de Ballon (équibiaxial) - et de l'équipement de mesure 50
Figure 3.9 Exemple typique des résultats des tests de perforation – Déplacement vertical pour le nitrile de 0,30 mm d'épaisseur 51

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 3.10 Dépendance de l'angle au sommet de la sonde par rapport à la force de perforation pour une sonde conique avec du néoprène 0,78 mm d'épaisseur. (Les sondes cylindriques correspondent aux cas de $\theta = 0°$ et $\theta = 90°$) 51
Figure 3.11 Force de perforation normalisée en fonction du diamètre de la tête de la sonde pour différentes épaisseurs (t) du néoprène (sonde cylindrique avec tête plane) 52
Figure 3.12 Relation entre la force de perforation normalisée (F/t) et le diamètre de la tête de la sonde 53
Figure 3.13 a) Déformation de l'échantillon autour de la sonde à tête plane ; b) Déformation à tête plane ($e_1 = e_2$) (matériau : nitrile, tête de la sonde : d = 2,5 mm)....54
Figure 3.14 Images des pièces de matériaux coupés lors des essais de perforation avec des sondes cylindriques à tête plane des différents diamètres (par microscope 20x) 55
Figure 3.15 a) Déformation de l'échantillon autour de la sonde à tête arrondie; b) Déformation autour de la tête arrondie (matériau : nitrile, tête de la sonde : d = 2.5 mm)....57
Figure 3.16 Vue de la déformation du matériau avec une sonde conique (a) et représentation schématique de la déformation d'un matériau au niveau de la tête d'une sonde cylindrique à tête plane (b) et conique (c) 58
Figure 3.17 Force de perforation calculée et résultats d'essais avec des sondes coniques et cylindriques pour le nitrile (épaisseur de la membrane h = 0,3 mm, C_1 = 902 kPa, et $\alpha = 0,28$) 60
Figure 3.18 Force de perforation calculée et résultats d'essais pour des sondes coniques et cylindriques pour le caoutchouc naturel (h = 1,0 mm, C_1 = 70 kPa, $\alpha = 2,96$) 60
Figure 3.19 Aiguille médicale et description de la définition 1 de la perforation 62
Figure 3.20 Force en fonction du déplacement vertical des aiguilles médicales lors d'un test de perforation (néoprène 1,57 mm d'épaisseur) 62
Figure 3.21 Dégradation de la tête de l'aiguille 63
Figure 3.22 Surface de la rupture créée par une aiguille médicale sur du néoprène 1,57 mm d'épaisseur (microscopie optique 20x) 64
Figure 3.23 Effets du vieillissement à 160 °C sur l'élongation en traction à la rupture et sur la perforation 66
Figure 3.24 Effets du vieillissement à 160 °C sur la contrainte de traction à la rupture et sur la perforation 66
Figure 3.25 Déformations au niveau de la tête de la sonde pour différents matériaux 67
Figure 3.26 Variation du module de néoprène avec le temps de vieillissement à différentes températures de vieillissement 67
Figure 3.27 Effet du vieillissement à différentes températures sur la résistance à la perforation des aiguilles médicales d = 0,5 mm (néoprène 1,57 mm) 68

1. INTRODUCTION

Les blessures aux mains comptent pour environ 20 % de l'ensemble des lésions indemnisées par la CSST avec des déboursés de plus de 230 millions pour la période entre 1995 et 1997[1]. Dans certains types d'industries du secteur Métal - électrique, ce pourcentage peut atteindre 30 % des lésions[2]. La plupart de ces lésions sont des coupures et des piqûres causées par la manipulation de pièces métalliques, du verre ou des outils. L'utilisation de gants de protection adaptés au type de risque et au type de travail réalisé pourrait diminuer le nombre ou la gravité de ces lésions. Cependant, les risques retrouvés en milieu de travail sont multiples, piqûres, coupures et éraflures simultanées. Il n'existe pas présentement de gants protégeant contre des risques multiples. En effet, les études réalisées à l'IRSST ont démontré que dans la plupart des cas, les gants résistant à la piqûre ne sont pas résistants à la coupure et vice versa. Par exemple, un gant fait en Nitrile modèle 37-165 de la compagnie Ansell, s'est avéré être un des plus résistants à la piqûre parmi les gants commerciaux évalués[3]. Le même gant, s'est avéré être un des moins résistants à la coupure dans une étude subséquente[4].

Les recherches sur les gants de protection réalisées à l'IRSST depuis 1987 ont été orientées principalement vers le développement des méthodes d'essai pour caractériser la résistance de gants à la perforation[3] et à la coupure[4,5]. Cette orientation était justifiable car au début de ces travaux, il n'y avait pas de méthode valable pour évaluer et classifier les matériaux utilisés dans la fabrication des gants de protection par rapport à leur résistance aux agresseurs mécaniques. Ces travaux ont conduit au développement des normes ISO 13997[6] et ASTM 17901342[7] pour caractériser la résistance à la coupure et de normes pour caractériser la résistance à la perforation, telles que la norme ASTM1342[8]. Bien que ces normes permettent la classification de la résistance des matériaux de protection par rapport à la coupure et à la perforation, elles ne donnent pas d'information sur les propriétés intrinsèques des matériaux. Par exemple, il a été démontré au cours de ce projet, que les matériaux des gants de protection ayant une bonne résistance à la coupure suivant le test normalisé n'auraient pas de résistance lorsqu'ils seraient utilisés, à cause de la déformation du matériau ou bien à cause de la contamination avec des huiles.

Objectifs et hypothèses de recherche. L'objectif principal de l'étude était d'étudier les mécanismes de rupture par rapport à la coupure et la perforation. Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettra d'aider les fabricants à améliorer la résistance des gants aux risques mécaniques complexes tout en permettant une dextérité en accord avec les tâches réalisées. Le projet a été réalisé par une équipe multidisciplinaire de chercheurs universitaires avec une expertise sur les propriétés mécaniques des matériaux, des spécialistes des compagnies fabriquant des matériaux et des gants de protection et des chercheurs de l'IRSST. Afin de présenter les progrès de cette recherche et échanger avec les fabricants des gants et des matériaux, un atelier de travail du comité F-23 de l'ASTM a été organisé à l'IRSST en septembre 2003. De plus, les informations issues de cette étude ont été présentées aux réunions du comité F23 de l'ASTM et ont fait l'objet de présentations dans des congrès, et des articles scientifiques ont été soumis à des journaux pour publication.

Comme point départ de cette étude, les résistances à la perforation et à la coupure des gants de protection ont été étudiées avec les techniques mises au point à l'IRSST[4,6]. De plus, des techniques complémentaires basées sur la mécanique de la rupture ont permis de mesurer à la fois les énergies reliées à l'initiation et à la propagation d'une fissure lors de la rupture d'un matériau. Les connaissances développées dans ce projet, permettront avec la collaboration des compagnies fabricant des gants, de développer des matériaux assurant une bonne protection aux risques mécaniques multiples dans une deuxième phase de cette recherche.

Vu la quantité d'informations accumulées dans cette étude, nous présenterons les résultats regroupés en deux sections : ceux qui traitent de l'étude sur la coupure et ceux qui traitent de l'étude sur la perforation. D'autres informations feront l'objet de publications scientifiques et de thèses de doctorat d'étudiants participant à cette étude.

2. ÉTUDE SUR LA COUPURE

La résistance à la coupure est l'une des propriétés que doivent rencontrer les matériaux utilisés dans la conception de vêtements, de gants et de bottes de protection destinés à se protéger contre des agresseurs mécaniques en milieu de travail. Assez étonnamment, il y très peu de travaux rapportés dans la littérature à ce sujet. Quelques tentatives ont été faites pour mesurer l'énergie de coupure de quelques caoutchoucs et feuilles de polyéthylène en l'absence du frottement dans des matériaux utilisés pour d'autres types d'applications[9,10,11]. Les essais effectués dans ces travaux consistaient à pousser une lame de rasoir dans un échantillon mince maintenu sous la charge de tension en mode I. On assume que toute l'énergie nécessaire pour propager une coupe (l'énergie de rupture) est la somme d'énergies pour provoquer la déchirure et la coupure du matériau. En mesurant la force nécessaire pour propager la coupe du matériau avec différentes énergies de déchirure (taux de restitution d'énergie lorsque la fissure se propage) et en supposant que l'énergie de rupture est constante, l'énergie de coupure peut être déterminée. Il a été démontré que le rapport entre l'énergie élastique appliquée à l'échantillon et l'énergie pour couper un matériau doit être dans la gamme entre 0,2 et 0,7[11]. Si l'énergie élastique n'est pas suffisamment grande, le frottement entre le matériel et la lame peut augmenter l'énergie de rupture. Si l'énergie élastique est trop grande, la déchirure a lieu en avant de la lame et l'énergie de coupe ne pourra pas être correctement mesurée. Il a été constaté que l'énergie de coupure est généralement très inférieure à celle de la déchirure, étant donné que le rayon au bout d'une déchirure est beaucoup plus grand que le rayon du bout de lame. Par conséquent, l'énergie dissipée par la déformation plastique est beaucoup plus grande. Il a aussi été démontré que l'énergie de coupure est directement reliée au rayon de la lame. Cette approche permet donc de mesurer la propriété intrinsèque des matériaux en termes de résistance à la coupure. Cependant, elle reflète une situation très particulière où l'échantillon est étiré dans une gamme spécifique des déformations.

Dans la pratique, la résistance à la coupure peut comprendre deux mécanismes : l'un reflétant la force intrinsèque du matériau et l'autre une contribution de la friction. Pour simuler la coupure, divers tests de laboratoire ont été développés[3,4,5,,12,13]. Plus récemment, une norme internationale a été établie pour évaluer la résistance à la coupure des matériaux utilisés dans les vêtements de protection[6]. Dans cette méthode, une force normale et un déplacement sont appliqués à une lame droite maintenue perpendiculaire à la surface d'un échantillon, collé sur un porte-échantillon. Cette méthode d'essai a été développée à l'IRSST et a été normalisée par ISO[6] et ASTM[7]. La méthode consiste à déterminer le déplacement nécessaire pour qu'une lame qui glisse sur un matériau, le coupe lorsqu'une force normale constante est appliquée au point de contact lame-matériau. Les essais sont réalisés avec un mouvement de lame qui varie généralement entre 3 et 50 millimètres, en variant la force normale appliquée sur la lame. La résistance à la coupure est établie par calcul par une régression non linéaire, à partir des données obtenues pour une série d'au moins 15 essais à au moins trois charges différentes. Elle est définie comme étant la force nécessaire pour couper l'échantillon avec un déplacement de la lame de 20 millimètres. La valeur de la force normale appliquée est ainsi employée pour classifier la résistance à la coupure des matériaux de protection.

Il existe une certaine variabilité de la géométrie du tranchant de la lame. Pour corriger les résultats obtenus avec des lames provenant de lots différents, on utilise un matériau de référence, du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, qui est stocké à l'IRSST. La valeur de référence établie, selon les normes ISO 13997 et ASTM 1790, est le déplacement de la lame nécessaire pour couper le matériau de référence avec une charge de 5 N (ou 500 g) qui est de 20 millimètres.

Le développement à l'IRSST de la méthode d'essai pour évaluer la résistance des gants de protection à la coupure[4,5] a ouvert la possibilité d'étudier plus en profondeur ce phénomène. L'hypothèse de départ de cette étude était que la coupure soit associée au phénomène de propagation d'une rupture. L'influence des différentes forces qui interviennent dans la coupe d'un matériau, telles que la force normale appliquée et la force de friction développée pendant l'essai, sur le niveau de résistance à la coupure ont été analysées. La contribution de l'effet de friction a été mise en évidence et elle est discutée en détail. Aussi, l'effet de la dureté et de l'épaisseur du matériau ainsi que de la vitesse d'essai sur le comportement des matériaux par rapport à la coupure ont été étudiés. Des mesures de l'énergie de propagation d'une fissure ont été effectuées afin de la comparer avec la résistance à la coupure. Pour ce faire, des nouveaux montages expérimentaux intégrés à l'appareil TDM-100 ont été développés dans le cadre de ce projet.

La première partie du rapport fait état des travaux visant à analyser les effets du frottement sur la résistance à la coupure des matériaux, en utilisant la norme internationale ISO 13997, qui est employée comme une référence pour évaluer la résistance à la coupure des matériaux de protection.

2.1 Partie expérimentale

La méthode mise au point à l'IRSST pour caractériser la résistance à la coupure[4,5] a été utilisée dans cette étude. Cette méthode consiste à faire glisser une lame ayant une géométrie bien déterminée, sur un matériau, en appliquant au point de contact lame - matériau, une force qui doit demeurer constante pendant la durée de l'essai. Une série d'essais avec au moins trois charges différentes, en répétant cinq fois l'essai pour chaque charge, a été réalisée. Lors d'une étude précédente, il a été démontré qu'il existe une relation non linéaire entre la charge appliquée pour produire la coupure du matériau et la distance parcourue par la lame. La résistance à la coupure est calculée à l'aide d'une équation non linéaire afin d'obtenir la force nécessaire pour couper un matériau avec un déplacement de la lame de 20 mm. Cette méthode d'essai a été internationalement reconnue par les organismes de normalisation[6,7].

2.1.1 L'appareil de coupure

Le principe de la méthode est décrit dans le schéma présenté à la figure 2.1. L'essai consiste à faire glisser une lame droite, en appliquant une force normale, sur un échantillon et à mesurer le déplacement de la lame nécessaire à couper à travers l'épaisseur de l'échantillon. L'appareil de référence utilisé pour caractériser la résistance à la coupure est le TDM-100 qui est montré à la figure 2.2. Un capteur de force de 44 N (10 livres) de capacité qui est fixé à une extrémité du porte-lame, tel que montré à la figure 2.3, permet de mesurer la force horizontale de frottement développée lorsque la lame glisse et pénètre le matériau. L'appareil est contrôlé par ordinateur.

Un autre appareil, une version de laboratoire qui est aussi instrumentée, permet de mesurer simultanément la charge normale appliquée et la force tangentielle. Ce montage qui a été décrit en détail dans un rapport précédent, a aussi été utilisé dans cette étude. La vitesse de la lame est maintenue constante, contrôlée par un moteur électrique de Superior Electric Company, Bristol, CT., États-Unis, type M091-FC09, qui permet de réaliser différentes vitesses entre 1 et 900 mm/min.

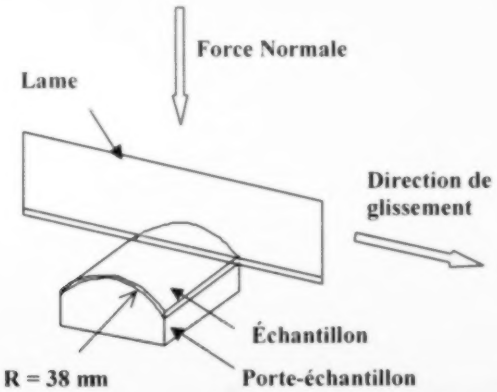


Figure 2.1 Schéma décrivant le principe de la méthode de coupure

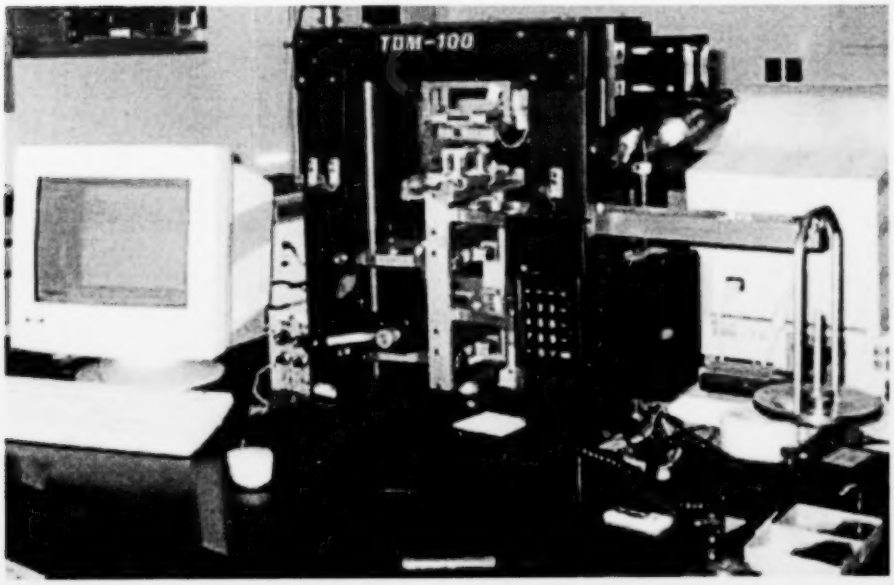


Figure 2.2 Version instrumentée du TDM-100

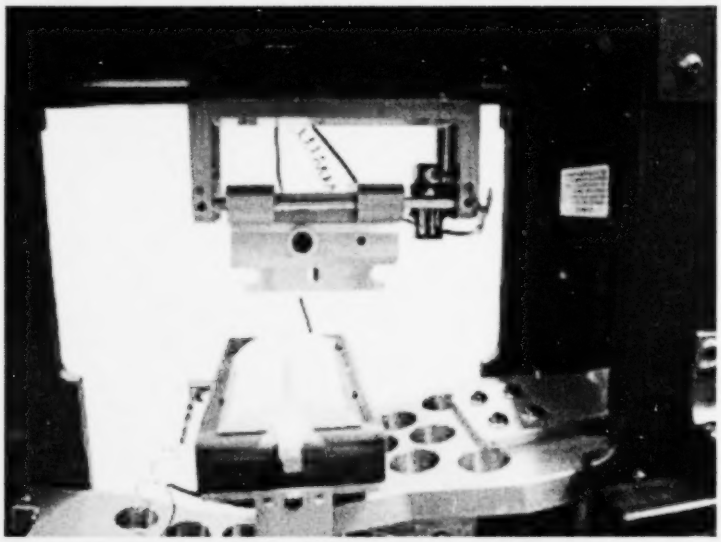


Figure 2.3 Support de lame incluant un capteur de force pour mesurer la force horizontale de friction

Lors de l'essai de coupure, la lame se déplace horizontalement avec une vitesse constante. Le spécimen est attaché avec le ruban adhésif sur la surface courbée du porte-échantillon, qui a un rayon de 38,0 ± 0,5 mm. Directement sous le spécimen, une feuille d'aluminium de 0,8 mm de large avec une épaisseur de 0,03 mm est installée à la partie centrale du porte–échantillon, tel que montré à la figure 2.3. Lorsque le spécimen est coupé, la lame touche la feuille d'aluminium, ce qui provoque un contact électrique qui arrête automatiquement l'essai. Le capteur de charge installé du côté du porte-lame mesure la force de friction développée pendant l'essai. Un système de contrôle commande la vitesse de la lame et l'arrêt de l'expérience. L'acquisition et le traitement des données ont été faits par ordinateur. Pour cette étude, la plupart des essais ont été réalisés à 150 mm/min. Afin de caractériser l'effet de la vitesse de la lame sur les résultats, des essais ont été réalisés à différentes vitesses de lame entre 1 et 900 mm/min.

2.1.2 Méthode de coupure en absence de friction avec glissement de la lame

Un montage expérimental a été mis au point afin de caractériser la résistance des matériaux à la coupure en absence de friction. Un schéma décrivant le principe de ce montage est montré à la figure 2.4. Dans ce cas, l'échantillon est placé en position verticale avec ses deux extrémités fixées par des attaches au porte-échantillon, tel que montré à la figure 2.5. L'un des systèmes d'attache est fixe et l'autre amovible, ce qui permet d'ajuster la tension appliquée sur l'échantillon lors d'un essai. Une des attaches est reliée à un capteur de force qui mesure la tension appliquée sur l'échantillon et l'autre est reliée à une vis qui permet d'ajuster la tension appliquée. Ce type de montage permet de fixer des échantillons de dimensions différentes. Avant

de réaliser le test, une entaille en forme de V est faite au centre de l'échantillon. Lors du test, la lame est mise en contact avec le centre de l'entaille de l'échantillon auquel on a appliqué une tension contrôlée. La force normale appliquée est faible et elle est fonction du type de matériau. La lame se déplace horizontalement à une vitesse de 150 mm/min provoquant une coupe dans le sens vertical du matériau. Pour ce type d'essai, on utilise un capteur de force de 4,54 kg attaché au porte-lame.

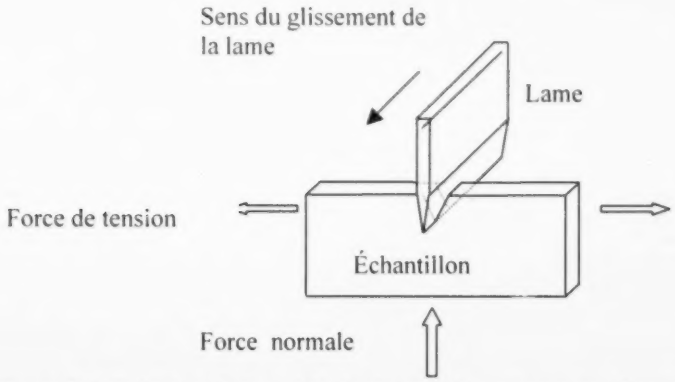


Figure 2.4 Principe de la méthode d'essai de coupure en absence de friction

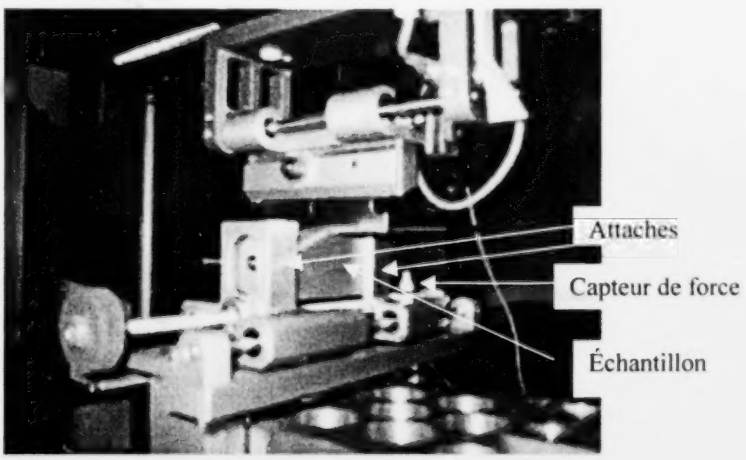


Figure 2.5 Porte–échantillon pour les essais en absence de friction

2.1.3 Coupure en absence de friction sans glissement de la lame (méthode Lake & Yeoh)[9]

Dans cette méthode, un échantillon en forme de Y tel que montré à la figure 2.6 est installé à la partie fixe de l'appareil MTS. La tension sur l'échantillon dans ce cas est appliquée par deux poids via deux poulies avec une ouverture (angle 2θ) tel que montré à la figure 2.6. Le test de coupure est réalisé dans ce cas avec une lame qui est fixée à la cellule de force à la partie mobile de la machine MTS, qui effectue un mouvement descendant à vitesse contrôlée sur l'échantillon. Dans ce cas, le test de coupure se réalise sans glissement de la lame.

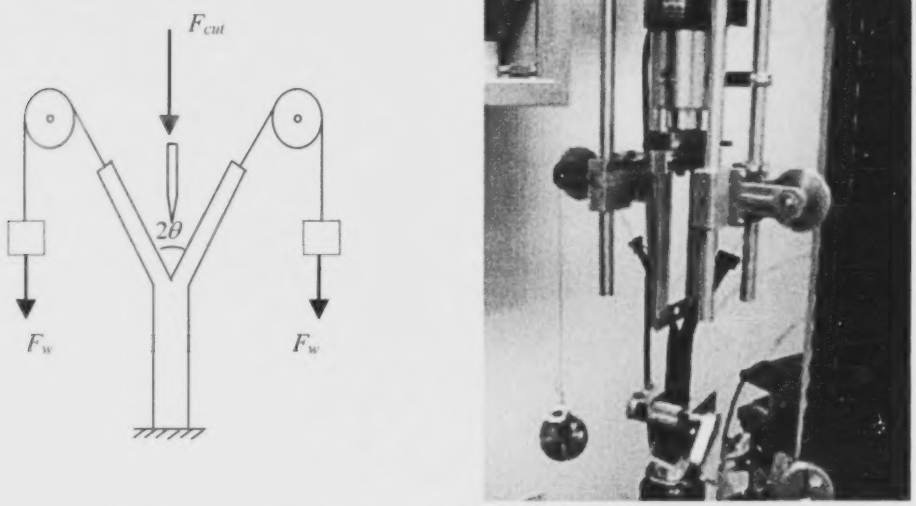


Figure 2.6 Schéma du principe de la méthode coupure de Lake &Yeoh (à gauche) et photo du montage expérimental (à droite)

2.1.4 Caractérisation de la lame

La lame est le type de GRU-GRU, model 88-0121, de la compagnie American Safety Razor Co, d'une dureté de 78-80 Rockwell. La lame est de 70 millimètres de long, 18 millimètres de large et de 1,00 ± 0,05 mm d'épaisseur. Elle a un biseauté de 2,5 ± 0,2 mm du bord droit, avec un angle (apex) de 32° à 40° et 0,28 mm de haut, et un deuxième angle α de 22°. La figure 2.7a est une micrographie optique de la rugosité du bord de lame magnifié 200 fois, et la figure 2.7b illustre la géométrie de lame.

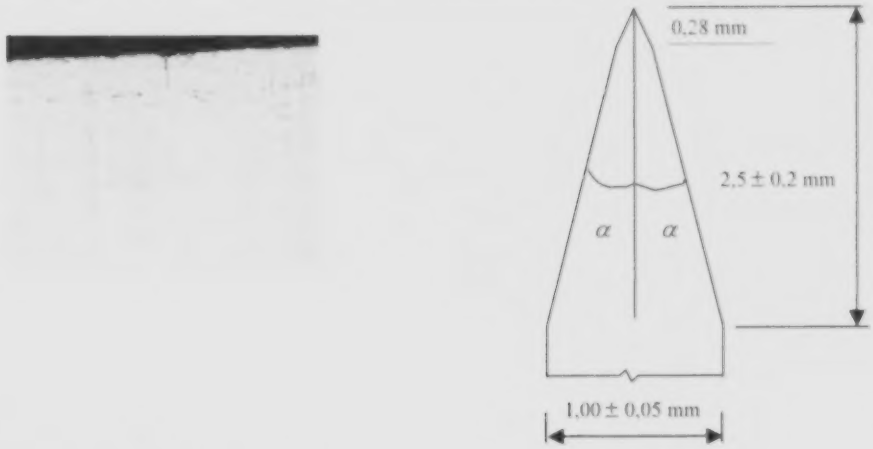


Figure 2.7 L'image du bord de lame magnifié 200 fois (a) et la représentation schématique de la géométrie de lame (b)

Les caractéristiques de la lame sont contrôlées avec un microscope Mitutoyo Measuring Microscope TM–500, modèle Quadra-Check 200 avec afficheur numérique de Metronics Inc., Bedford, New Hampshire. Ce montage est montré à la figure 2.8.

Figure 2.8 Microscope 2D de Mitutoyo servant à caractériser la géométrie de la lame

2.1.5 Matériaux

Du néoprène avec des épaisseurs de 0,41 mm, de 0,79 mm et de 1,57 mm provenant de la compagnie Fairprene Products Industriel Cie., Etats-Unis, est utilisé comme matériel et employé comme référence dans les normes ISO 13997 et d'ASTM F1790 : des gants de nitrile, Solvex 37-165 de la compagnie Ansell, fabriqués en Angleterre; des gants en caoutchouc naturel, de Kachele-Cama # 574 KCL, de la compagnie Elchenzell de Strantfords Ltd, GmH, Allemagne. Un tissu de fibre de verre, satin 8-harness (tissu 38 d'avion) fourni par Plastiques Canada a été employé comme exemple d'un matériel avec un coefficient de friction très bas.

2.2 Résultats

2.2.1 L'effet du coefficient de friction

La figure 2.9 est un exemple typique des informations obtenues lors d'un test de coupure en utilisant l'appareil TDM 100 instrumenté. Cette courbe montre la force tangentielle développée lorsque la lame coupe et pénètre un échantillon de néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, sous une force normale appliquée de 5 N. On peut voir que la force tangentielle (ou force de friction) augmente avec le déplacement de la lame pendant la coupure du matériau. La valeur maximale correspond au moment où la lame a atteint la face inférieure de l'échantillon, qui est détecté par le contact électrique entre la lame et la feuille d'aluminium qui se trouve en dessous de l'échantillon.

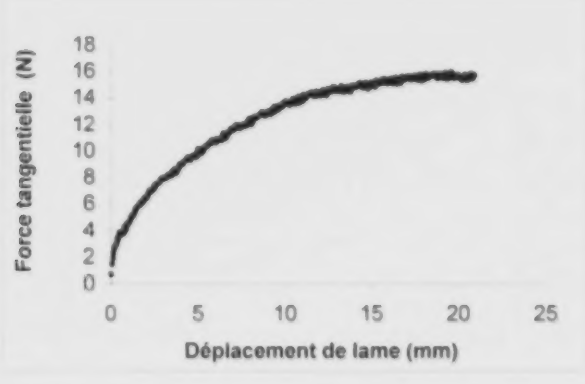


Figure 2.9 Force tangencielle en fonction du déplacement de la lame lors d'un test De coupure de néoprène de 1,57 mm d'épaisseur

La figure 2.10 montre la variation du déplacement de la lame en fonction de la charge normale appliquée pour les échantillons en néoprène de 0,41 mm, 0,79 mm et 1,57 mm d'épaisseur. Cette figure correspond aux résultats typiques obtenus lors de la caractérisation de la résistance à la coupure avec les méthodes normalisées ISO et ASTM.

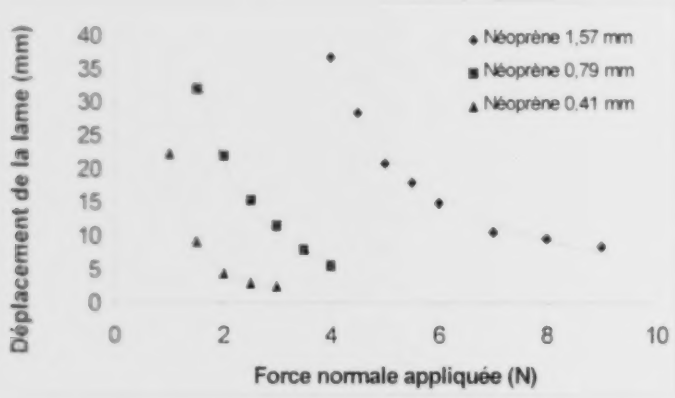


Figure 2.10 Déplacement de la lame à la coupure en fonction de la force normale appliquée pour différentes épaisseurs de néoprène

Les résultats présentés dans la figure 2.10 démontrent que la résistance à la coupure pour un même type de matériau est reliée à son épaisseur. Pour comparer le niveau de résistance à la coupure d'un matériau par rapport à un autre, on détermine la force nécessaire pour provoquer une coupe avec un déplacement de lame de 20 mm. Dans ce cas, la résistance à la coupure sera d'environ 1N, 2N et 5N respectivement pour les néoprènes de 0,41, 0,79 et 1,57 mm d'épaisseur. La figure 2.11 montre ce même type de relation pour un gant de nitrile de 0,61 mm d'épaisseur (Ansell 37-165) pour lequel la résistance à la coupure est d'environ 1,8 N.

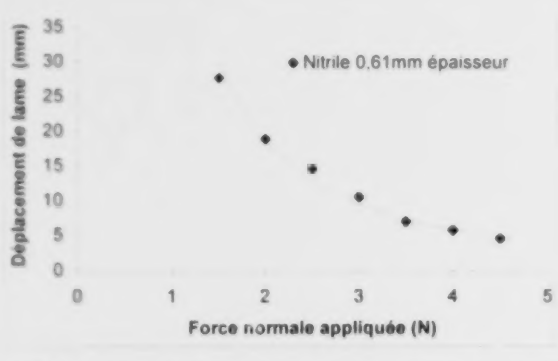


Figure 2.11 Déplacement de la lame à la coupure en fonction de la force normale appliquée pour le nitrile

2.2.2 L'énergie de coupe

La surface sous la courbe de la force tangentielle versus le déplacement de la lame présentée dans la figure 2.9 correspond à l'énergie nécessaire pour couper le matériau par rapport à la force tangentielle, qui dans cet exemple est d'environ 300 mJ. Cependant, l'énergie dépensée par rapport à la force normale appliquée est de 5 N x 1,57 mm = 7,85 mJ. Ceci démontre que l'énergie dépensée pour couper le néoprène provient fondamentalement de la force de friction due à l'interaction entre le matériau et les bords de la lame qui glisse, coupe et pénètre le matériau. La figure 2.12 représente les énergies calculées pour couper deux épaisseurs de néoprène dont les résultats ont été présentés à la figure 2.10.

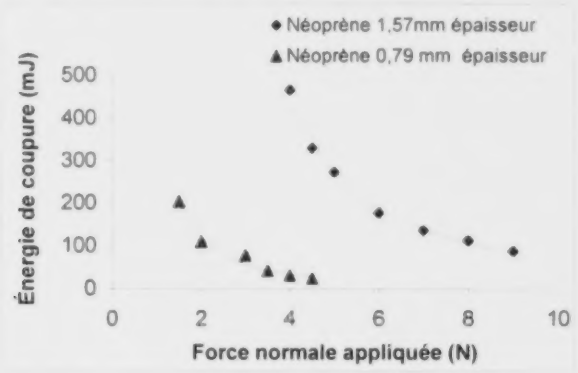


Figure 2.12 Énergie de coupure en fonction de la force normale appliquée

À la figure 2.12, on peut voir tel que prévu, que l'augmentation de la charge appliquée conduit à une réduction du déplacement de la lame et de l'énergie par rapport à la force tangentielle. Cette force tangentielle comprend l'énergie de friction et l'énergie impliquée dans la création de la surface de coupure dans l'échantillon.

2.2.3 Analyse du phénomène de coupure

Puisque l'étude préliminaire réalisée sur les caoutchoucs néoprène et nitrile, les matériaux les plus utilisés pour la fabrication des gants et des vêtements de protection, a démontré une contribution importante de la friction, nous avons étudié plus en détail ce phénomène et la contribution des différentes forces en jeu.

L'expérience suivante a été développée pour départager la contribution des différentes forces en jeu dans le phénomène de coupure d'un matériau. Cette expérience consiste à réaliser un test de coupure incomplet (sans traverser le matériau) suivi d'un glissement de la lame à l'intérieur de l'entaille laissée dans le néoprène dont l'épaisseur est 1,57 mm. Pour ce faire, une force de 9N a été appliquée au point de contact lame-matériau. Le test a été démarré comme un test de coupure normal jusqu'au point A de la figure 2.13. À ce moment, le bras de levier de l'appareil TDM a été bloqué juste avant de compléter la coupe du matériau tout en permettant à la lame de

continuer son mouvement. Les résultats de ce test sont montrés à la figure 2.13. Le point A de cette figure est le moment du blocage du bras de levier, après quoi, la force normale devient nulle. Pendant la pénétration de la lame, la force tangentielle augmente avec la distance parcourue par la lame, pour atteindre une valeur maximale au point A qui correspond au moment de pénétration maximale de la lame.

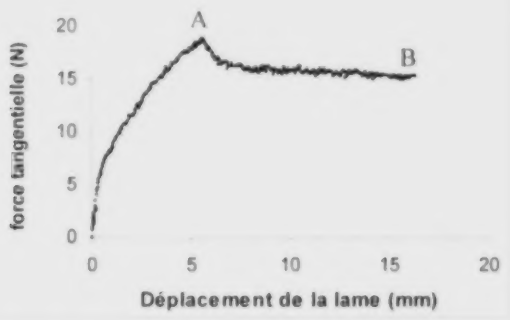


Figure 2.13 Force tangentielle avec une pénétration partiale de la lame dans du néoprène 1,57 mm d'épaisseur (section 0-A, $F_N = 9N$; section A-B $F_N = 0$)

Le signal enregistré après ce maximum (section A-B de la courbe) représente seulement la force de friction due à la pression latérale exercée par le matériau sur les bords de la lame (il n'y a plus de coupure dans cette section). La légère diminution de la force tangentielle est probablement due à la dégradation superficielle du néoprène pendant le frottement avec la lame en acier. Pour confirmer cet effet de pression latérale, une autre expérience a été réalisée. Après un essai de coupure complète, la lame a été levée légèrement juste assez pour enlever du contact avec la feuille d'aluminium et le bras de levier a été bloqué. Le mouvement horizontal de la lame a été ensuite redémarré et la force tangentielle exercée par le matériau sur la lame a été enregistrée. Le résultat de ce test est montré à la figure 2.14.

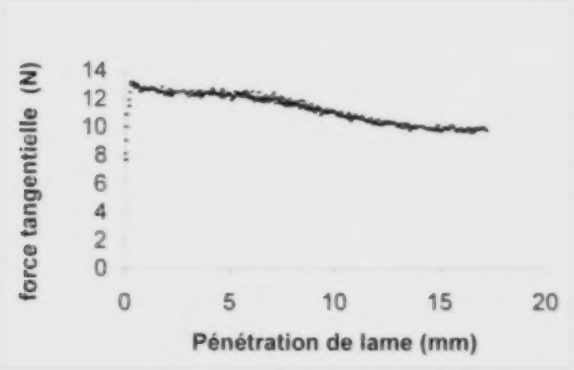


Figure 2.14 Force tangentielle due au glissement de la lame dans une section du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur déjà coupée

Dans ce cas, bien que seulement la force de pression latérale du matériau sur la lame soit impliquée, la force tangentielle enregistrée débute à une valeur équivalente de celle enregistrée à la fin de la coupure du matériau. Le résultat indique clairement que l'énergie dépensée dans la coupure dépend, pour une grande partie, de la force de friction due à l'interaction de l'échantillon avec les deux côtés de la lame. On peut également voir que la force de friction diminue légèrement avec la distance de la lame, ce qui est dû probablement à la dégradation du matériau à la surface de contact de l'échantillon avec la lame.

2.2.4 Relation entre force de friction et force normale

La figure 2.15 montre la relation existante entre la force normale appliquée lors d'un essai de coupure et le maximum de la force de friction au moment de la coupe du matériau.

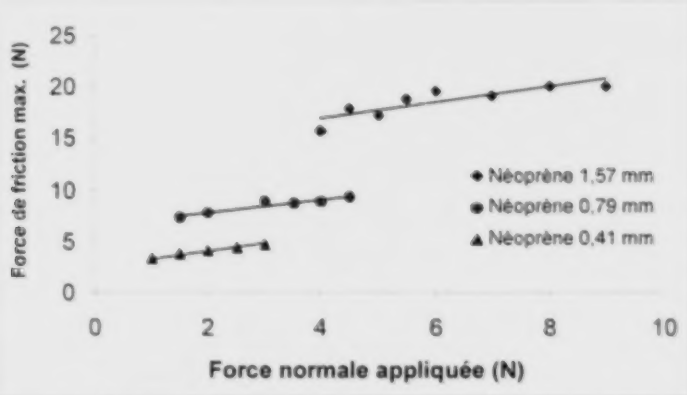


Figure 2.15 Force de friction maximale en fonction de la force normale appliquée pour différentes épaisseurs de néoprène

On peut voir dans cette figure que l'augmentation de la charge normale conduit seulement à une légère augmentation de la force de friction. Par exemple, dans le cas d'une épaisseur de néoprène de 1,57 mm, la force de friction développée lors du test demeure très élevée peu importe la force normale appliquée. Ce résultat suggère que cette force est due fondamentalement au frottement entre la lame et le matériau. Cet effet est important parce que le matériau élastique exerce une pression latérale sur les deux côtés de la lame. Plus le matériau sera épais, plus l'effet sera important. Cette question peut être confirmée par les résultats présentés dans la figure 2.16 dans laquelle la force de friction maximale est tracée en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. L'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon a un effet très important sur la pression latérale et par conséquent, une augmentation considérable de la force de friction pendant la coupure est observée.

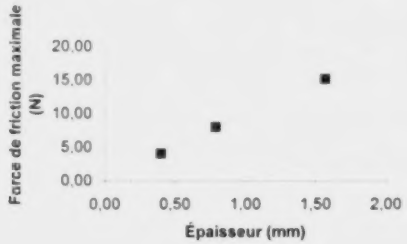


Figure 2.16 Force horizontale maximale en fonction de l'épaisseur du néoprène

2.2.5 *La coupure en absence de friction sans glissement de la lame*

L'énergie de coupure en l'absence de friction s'est avérée être une propriété intrinsèque du matériau [1-4]. Afin de départager la contribution des différentes forces impliquées dans le phénomène de coupure, des tests en absence de friction et sans glissement de la lame ont été réalisés. Ce type d'essai de coupure a été schématiquement présenté à la figure 2.6.

L'échantillon caractérisé est une pièce de néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, d'environ 100 mm de longueur et 4 mm de largeur, avec une entaille de 20 mm faite sur sa longueur, pour obtenir un échantillon en forme de Y. La coupure du matériau a été réalisée en poussant la lame sur le point central de l'entaille de l'échantillon. La figure 2.17 montre la force enregistrée en fonction de la pénétration de lame.

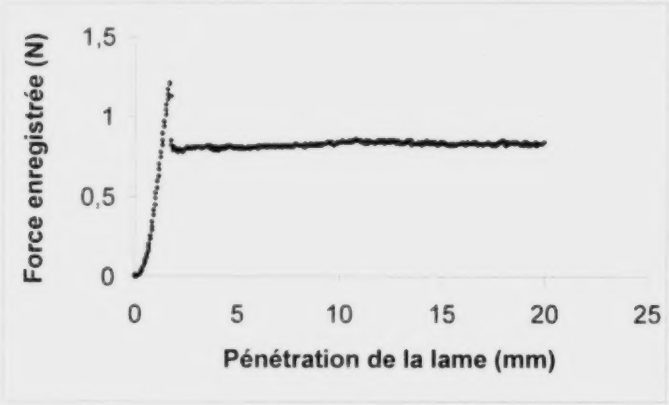


Figure 2.17 Force de pénétration en fonction du déplacement de la lame

Nous pouvons voir dans cet exemple que la force nécessaire pour couper le matériau en absence de friction est très faible comparée à celle nécessaire pour couper le même échantillon avec le test normalisé (voir figure 2.9).

Les essais ont été répétés avec différentes forces d'étirement de l'échantillon. Pour une petite déformation de l'échantillon, l'énergie T de déchirement et l'énergie C de coupure sont données par l'équation suivante :

$$T = 2 \lambda F_w (1 - \cos\theta) / t \qquad (2.1)$$

et

$$C = \lambda F / t \qquad (2.2)$$

où F est la force de coupure, F_w est la force de l'étirement, t est l'épaisseur de l'échantillon, 2θ est l'angle entre les jambes de l'échantillon en forme de Y, et λ est la déformation des jambes de l'échantillon. L'énergie totale par unité de surface, Gc (l'énergie de rupture) est représentée par :

$$G_c = T + C \qquad (2.3)$$

Les résultats présentés à la figure 2.18 montrent la variation de l'énergie de coupure en fonction de l'énergie de l'étirement selon l'équation 2.3. À partir de l'origine de cette droite, l'énergie de coupure en l'absence du frottement peut être obtenue. L'énergie de coupure dans ce cas sera de 0,77 mJ.

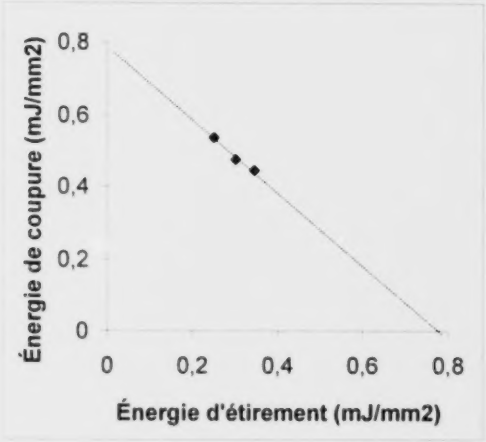


Figure 2.18 Énergie de coupure en fonction de l'énergie d'étirement du néoprène 1,57 mm d'épaisseur

Avec une épaisseur de néoprène de 1,57 mm, la surface coupée est d'environ 22 mm^2 et l'énergie totale dépensée dans une coupure sans frottement sera d'environ 17 mJ. Cette valeur est très inférieure à l'énergie par rapport à la force tangentielle mesurée lors d'un test de coupure avec l'appareil TDM, qui est présentée à la figure 2.11. Ces résultats suggèrent que la force et l'énergie tangentielle sont dues fondamentalement à la friction existante lors d'un test de coupure. Il faut noter qu'en présence du mouvement horizontal de la lame, la coupure implique un mode mixte de rupture (un mode I, voir figure 2.6 et un mode III, rupture par cisaillement). En conséquence, une comparaison directe avec l'énergie dépensée en mode I pur n'est pas rigoureusement exacte. Cependant, une telle différence dans les énergies impliquées ne peut pas être due à la présence du mode III. La contribution du mode III de rupture sera étudiée dans un prochain projet.

2.3 Analyse du phénomène de coupure selon la méthode standard

2.3.1 Analyse des forces en jeu

Riche des informations accumulées, nous allons proposer une interprétation du phénomène de coupure suivant la méthode d'essai standard. Dans cet essai, la coupure du matériau se produit lorsqu'une lame glisse et pénètre un spécimen sous une charge normale appliquée. Nous retrouvons deux types de contact entre la lame et le matériau qui se produisent simultanément : le contact entre le bout de la lame et le matériau qui cause la coupure et l'effort de cisaillement, causé par le contact du matériau avec les deux cotés de la lame que glisse. D'une part, pour couper le matériau, la lame doit surmonter les énergies provenant de la cohésion des molécules et le frottement d'hystérésis résultant du comportement viscoélastique du matériel. D'autre part, le contact élastique des deux côtés de la lame et du matériel, qui est dû à la compression latérale

résultante lorsque la lame glisse et pénètre le matériel élastique et la poussée due à la charge normale appliquée. De l'analyse ci-dessus, il est clair que deux aspects de frottement seraient impliqués. L'un serait le frottement macroscopique, induit par compression du matériel sur les deux côtés de la lame qui glisse et par la charge normale appliquée. L'autre serait un frottement dû au glissement de la lame qui provoque la coupure et qui se produit le long de l'extrémité du tranchant de la lame. La pression due à la force normale appliquée au point de contact de l'extrémité coupante de la lame avec le matériau est très élevée[14,15]. Cependant, le diamètre du bout de la lame est très petit, environ 0,1 à 0,2 µm, ayant comme résultat une force de frottement négligeable à ce point. Nous avons déjà démontré que l'énergie absorbée provenant du frottement latéral lame-matériau est beaucoup plus élevée que l'énergie intrinsèque nécessaire à couper le matériau.

La loi classique du l'Amontons-Coulomb-DeVinci établit que la force de friction est proportionnelle à la force normale appliquée et elle est indépendante de l'aire de la surface de contact. Sur une échelle microscopique, la force de friction est généralement liée aux contributions de l'adhérence et de l'hystérésis. La friction provenant de la contribution de l'adhérence est due à la formation et à la rupture des liens adhésifs, qui est le résultat des interactions moléculaires entre les surfaces en contact. La friction provenant de la contribution de l'hystérésis est la friction interne d'un matériel, qui résulte de la dissipation de l'énergie pendant des déformations cycliques des protubérances microscopiques à la surface et dépend des propriétés viscoélastiques des caoutchoucs. Les caoutchoucs avec un module très bas et ayant des grandes déformations élastiques sont assez mous pour avoir un contact intime avec des surfaces dures. Pendant le glissement, les chaînes moléculaires forment des jonctions locales entre les caoutchoucs et les substrats, et ces liens s'étirent et se cassent avant de former de nouvelles jonctions[16]. À faible vitesse de glissement, la surface d'un caoutchouc en contact avec un substrat se déformera d'une telle façon qu'épousera complètement le profil d'une surface rugueuse[17,18]. Cependant, lorsque le substrat est très lisse et propre, le mécanisme pour la friction serait dû seulement à l'adhérence moléculaire à l'interface. À température constante, la dépendance de la vitesse de glissement avec la force de friction doit être attribuée au nombre des liens adhésifs. La théorie de Johnson-Kendall-Roberts (JKR)[19] a prouvé que même si la charge normale est égale à zéro, une force d'adhérence existe au point de contact d'un caoutchouc mou et des surfaces dures.

Généralement, la force de friction due à la contribution de l'adhérence, F_{ah}, peut être écrite comme suit [14] :

$$F_{ah.} = \sum_{i=1}^{M} F_i = \sum_{i=1}^{M} A_i \tau_i \qquad (2.4)$$

où la A_i est la surface de contact macroscopique locale entre un élastomère et un substrat rigide rugueux et τ_i est la résistance au cisaillement efficace locale de l'interface. Ludema et Tabor[20] ont supposé que les liens d'adhérence à l'interface sont aussi forts que les liens intermoléculaires du caoutchouc lui-même. La résistance à la coupure peut être aussi une mesure de la résistance au cisaillement à la surface de contact. Basé sur le modèle de Voigt, Moore[15] a amélioré cette théorie simple et il a suggéré une équation pour la résistance au cisaillement comme suit :

$$|\tau| = \sqrt{E'^2 + (\omega\eta)^2}\ |e| = E' \sqrt{\left[1 + (\tan\delta)^2\right]}\ |e| \qquad (2.5)$$

e représente la contrainte dans la couche extérieure mince, E' est le module élastique, ω est la fréquence, η est la viscosité et $\delta = \eta\,\omega / E'$.

À la figure 2.13, nous avons présenté les résultats d'une expérience qui démontrait qu'il y avait un effet de friction très important même lorsqu'il n'avait plus de coupure du néoprène. Cette force de friction était la résultante de l'effet de la pression du matériau sur la lame jumelée à l'effet d'adhésion. Lorsque la lame glisse sans couper, la surface de contact lame-matériau reste inchangée et la valeur de la force de friction demeure pratiquement constante. La valeur élevée de la force de friction obtenue dans ces expériences a prouvé qu'il y avait une forte adhérence entre le matériel et la lame. Puisque la valeur de la force de friction demeure élevée alors que la lame continuait de glisser sans qu'aucune force normale ne soit appliquée, suggère que des jonctions moléculaires se sont créées entre la lame et le matériel en caoutchouc.

Dans cette analyse, nous faisons l'hypothèse que la valeur à laquelle la force moyenne de friction devient constante correspond à la force de serrage du matériau sur la lame qui sera représentée par F_g. La force maximum F_{hf} de friction au point A de la figure 2.13 est la résultante de la contribution de la force de friction F_{fl} due à la charge normale appliquée et de la force F_g de friction due à la pression que le matériel exerce sur la lame, représentée par l'équation 2.6.

$$F_{hf} = F_g + F_{fl} \qquad (2.6)$$

Le tableau 2.1 et la figure 2.18 présentent les contributions de la force de friction due à la force normale et de la force de serrage du matériau qui ont été calculées à partir des essais réalisés sur le néoprène de 1,57 mm d'épaisseur suivant l'équation 2.6.

Tableau 2.1 Force de friction due au serrage du matériau sur la lame et à la force normale appliquée lors de la coupure du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, calculées selon l'équation 2.6

Force normale (N)	Force de friction maximum (N)	Force de friction due au serrage du matériau F_g(N)	Force de friction due à la force normale F_{fl} (N)
5	16,9	13,3	3,6
7	17,2	13,0	4,2
9	18,4	13,4	5,0

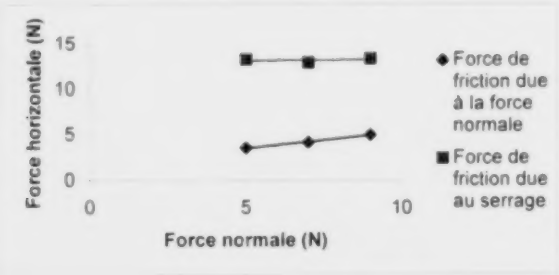


Figure 2.19 Valeurs calculées des forces de friction dues à la force de serrage et à la force normale appliquée lors de la coupure du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur

La figure 2.19 montre que pour les différentes charges appliquées, les forces de friction dues au serrage du matériau sur la lame demeurent inchangées et sont indépendantes de la charge normale appliquée, alors que les forces de friction résultante de la charge appliquée sont proportionnelles à la charge appliquée. Par conséquent, si les forces de friction dues aux interactions du bout de la lame avec le matériau sont négligées, les valeurs calculées de la contribution de la force de friction due au serrage à la force totale mesurée est beaucoup de fois plus grande que la contribution de force de friction due à la charge normale appliquée, tel que montré à la figure 2.19. Ceci indique clairement que l'énergie dépensée pour couper un matériau avec une lame en mouvement dépend la plupart du temps de l'adhérence entre le matériau et les côtés de la lame.

2.3.2 Mécanisme de friction lors de la coupure par glissement

Dans cette section, nous allons présenter une interprétation du mécanisme de la coupure des matériaux suivant la méthode normalisée. Les figures 2.19 et 2.20 illustrent le rapport existant entre la charge normale appliquée et les forces de friction maximum pour du néoprène, nitrile, caoutchouc naturel et d'un tissu en fibre de verre. Ce dernier a été choisi comme exemple d'un matériau ayant un coefficient de friction très faible. La force de friction maximale est définie comme la force tangentielle mesurée au moment où la coupure du matériau est détectée. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la force de friction mesurée est due à la contribution de la force normale appliquée et à de la force de serrage du matériel sur les bords de la lame.

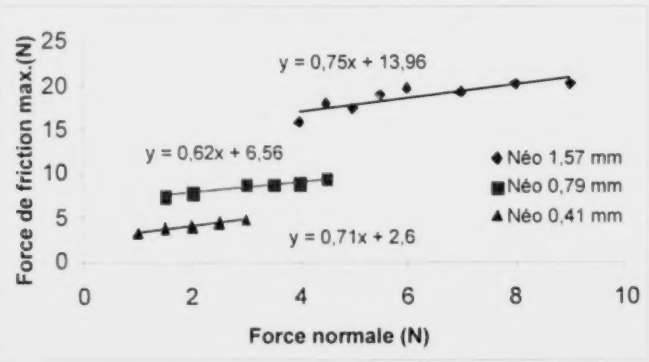


Figure 2.20 Force maximale de friction en fonction de la force normale appliquée lors des tests de coupure des néoprènes de différentes épaisseurs

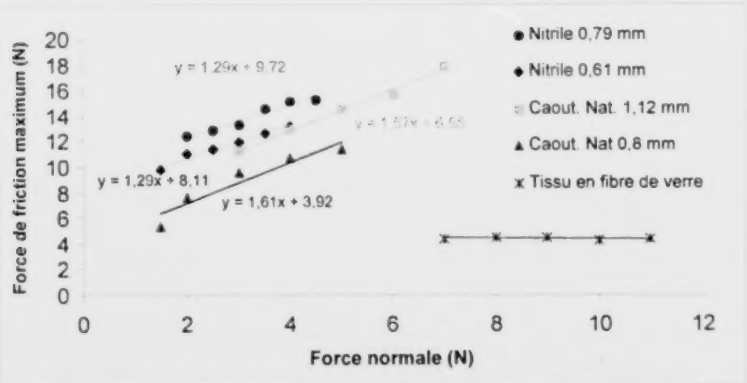


Figure 2.21 Force maximale de friction en fonction de la force normale appliquée lors des tests de coupure. Le tissu en fibre de verre a été utilisé comme exemple d'un matériau avec résistance à la coupure élevée et un faible coefficient de friction

Les figures 2.20 et 2.21 montrent que pour les caoutchoucs néoprène, nitrile et le caoutchouc naturel, il existe une relation linéaire entre les forces de friction maximales mesurées et les charges normales appliquées. Cette relation linéaire peut être représentée par l'équation suivante,

$$F_{hf} = \mu_n F_N + F_{adh} \qquad (2.7)$$

où F_{hf} est la force de friction horizontale, F_N est la charge normale appliquée et μ_n (qui représente la pente de la courbe) est le rapport entre la force de friction mesurée et la charge normale appliquée (soit, le coefficient de friction). Le deuxième terme, F_{adh}, est une constante qui est indépendante de la charge appliquée et qui est reliée à la surface de contact apparente lame-matériau A_c et conséquemment est relié à l'effet de serrage du matériau sur la lame. Les

résultats présentés dans les figures 2.20 et 2.21 montrent que la pente de la courbe est une constante pour le même type de matériel et elle est indépendante de l'épaisseur du matériau. Le tableau 2.2 présente les valeurs calculées de la force d'adhérence F_{adh}, en utilisant l'équation 2.7 et les forces d'adhérence par unité de surface de contact. Nous pouvons constater que la valeur de la force de friction F_g du tableau 2.1 et la valeur de F_{adh} dans le tableau 2.2 pour le néoprène 1,57 mm d'épaisseur sont presque identiques. Ceci confirme que F_{adh} est liée à la force exercée par le matériel sur la lame et elle est proportionnelle à la surface de contact.

Tableau 2.2 Force d'adhérence F_{adh} calculée pour la coupure du néoprène, du nitrile et du caoutchouc naturel

Matériel	Surface de contact A_c (mm^2)	Force d'adhésion lame matériau F_{adh} (N)	F_{adh} / A_c (N/mm^2)
Néoprène 1,57 mm	47,34	13,96	0,29
Néoprène 0,79 mm	16,77	6,15	0,37
Néoprène 0,41 mm	6,24	2,60	0,41
Nitrile 0,79 mm	16,77	9,72	0,58
Nitrile 0,61 mm	11,36	8,11	0,71
Caout. naturel 1,12 mm	28,40	6,56	0,23
Caout. naturel 0,80 mm	17,10	3,92	0,23

La figure 2.22 est une représentation schématique de l'interprétation proposée sur les forces impliquées lors de la coupure d'un matériau en caoutchouc.

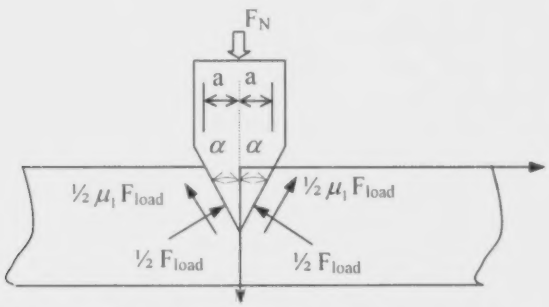


Figure 2.22 Diagramme de la distribution des forces dues à la charge normale appliquée

Lorsqu'une force normale est appliquée au point de contact lame-matériau toutes les forces dans la direction verticale sont en équilibre (voir la figure 2.22). Nous pouvons représenter cet équilibre par l'équation suivante,

$$F_N - \mu_1 F_{load} \cos\alpha - F_{load} \sin\alpha = 0 \qquad (2.8)$$

où μ_l est le coefficient de friction lame-matériel due au mouvement vertical; F_{load} est la force résultante de la pression sur le matériel qui est due à la charge normale appliquée; F_N est la charge normale appliquée et α est la moitié de l'angle du tranchant de la lame ou angle apex (voir la figure 2.22).

Par conséquent,

$$F_{load} = \frac{F_N}{\mu_l \cos\alpha + \sin\alpha} \qquad (2.9)$$

La contribution de la force de friction horizontale résultant de la force normale appliquée peut être représentée par l'équation suivante :

$$F_{fl} = \mu_n F_{load} = \mu_n \frac{F_N}{\mu_l \cos\alpha + \sin\alpha} \qquad (2.10)$$

$$\text{si } \mu_n F_{load} \approx \mu_n F_N \qquad (2.11)$$

$$\text{par conséquent, } \mu_l \approx (1 - \sin\alpha)/\cos\alpha \qquad (2.12)$$

De la théorie d'élasticité, la pression moyenne sur la surface de contact d'une cale symétrique en absence de friction est donnée par :

$$p = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \cot\alpha \qquad (2.13)$$

La pression moyenne et le coefficient de friction dans la direction verticale sont indépendants de la charge appliquée et proportionnelle à l'angle demi-apex de la cale. Quand cet angle diminue, la déchirure et la rupture du solide élastique se produisent et à ce moment, la lame peut commencer à glisser dans la direction verticale. Moore[15] a démontré que lorsqu'on fait glisser des cônes avec des angles différents sur un caoutchouc lubrifié, un déchirement se produit lorsque l'angle α était d'approximativement 30°.

Nous nous sommes servis de cet exemple pour l'appliquer au cas de la lame utilisée dans le test de coupure, ayant un angle semi-apex de 18° et en considérant $\mu_l = 0{,}7$ pour le néoprène. La valeur de $\mu_n F_{load}$ a été calculée avec l'équation 2.10 et ces résultats sont présentés dans le Tableau 2.3. Dans le même tableau sont rapportés les valeurs expérimentales de la force de friction due à la charge appliquée sur le néoprène de 1,57 mm d'épaisseur qui ont déjà été présentées à la figure 2.19 et au Tableau 2.1. De plus, les valeurs $\mu_n F_N$ obtenues à partir de la pente de la droite présentée à la figure 2.20 pour le néoprène 1,57 mm d'épaisseur sont aussi rapportées dans ce tableau. Nous rappelons que pour le cas du néoprène, les pentes des courbes reliant la force de friction à la force normale appliquée de la figure 2.20 sont d'environ 0,7 pour les trois épaisseurs du matériau, ce qui a été attribué au coefficient de friction. La comparaison

des résultats obtenus par les trois approches prouve que les calculs théoriques sont conformes aux valeurs expérimentalement obtenues.

Tableau 2.3 Comparaison des valeurs théoriques et des valeurs expérimentales de la force de friction résultant des charges normales appliquées sur le néoprène de 1,57 mm d'épaisseur

Force normale (N)	Calcul théorique	Résultats expérimentaux	
	μ_n F_{load} (N) (de l'équation 2.10)	μ_n F_N (de la Fig. 2.19) (N)	Force de friction due à la force normale (Fig. 2.18 et Tableau 2.1) F_{fl} (N)
5	3,6	0,7*5= 3,5	3,6
7	5,1	0,7*7= 4,9	4,2
9	6,5	0,7*9 = 6,3	5,0

Ces résultats démontrent que lorsqu'on coupe un matériau caoutchouc, il existe, autre que la force normale appliquée, F_N, une force d'adhérence aux interfaces lame-matériau très élevée, qui est la cause principale de la force F_{adh} de friction. Cette force sera proportionnelle à la surface de contact A_c lame-matériau et à la résistance au cisaillement τ des jonctions moléculaires formées à la surface de contact.

Par conséquent, la force d'adhésion F_{adh} peut être écrite de la façon suivante :

$$F_{adh} = \tau \, A_c \qquad (2.14)$$

Nous reprenons l'équation de Moore pour calculer la résistance au cisaillement

$$|\tau| = \sqrt{E'^2 + (\omega\eta)^2} \; |e| = E' \sqrt{\left[1 + (\tan\delta)^2\right]} \, |e|$$

Pour un caoutchouc typique à la température ambiante, avec un module élastique $E(\omega) \approx E(0)$ pour $\omega < \omega_c = 10^5 \, s^{-1}$, le frottement dû à la déformation interne peut être négligé et l'équation de Moore dans ce cas devient[21],

$$\tau \approx E' e \qquad (2.15)$$

Dans le cas des matériaux étudiés, l'élongation à la rupture est environ 340 % pour le néoprène, environ 400 % pour le nitrile et plus de 800 % pour le caoutchouc naturel. Pendant le glissement, les aspérités du caoutchouc peuvent être étirées sur une certaine distance. Quelle est la contrainte nécessaire pour casser les jonctions moléculaires à l'interface de matériel-lame? Le module de tension est 4,56 MPa pour le néoprène, 7,39 MPa pour le nitrile et 1,70 MPa pour le caoutchouc naturel. Ces valeurs ont été calculées à partir des essais en tension pour une élongation de 8 % mesurée avec un extensomètre laser. La vitesse d'essai a été la même utilisée pour les essais de coupure, à savoir 150 mm/min. Si nous faisons l'hypothèse que le contact

lame-matériau est parfait, il est possible de calculer, à partir des résultats expérimentaux, les valeurs de la contrainte moyenne nécessaires à casser les liens moléculaires à la surface de contact. Ces résultats sont présentés au Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Valeurs de force de rupture de liens d'adhésifs par élongation

Matériau	A_c (mm^2)	Force d'adhésion F_{adh} (N) (Fig. 2.19 et 2.20)	Force d'adhésion/A_c (N/mm^2)	E (Mpa)	e %
Néoprène 1,57 mm	47,34	13,96	0,30	4,56	6,58 %
Néoprène 0,79 mm	16,75	6,15	0,37	4,56	8,11 %
Néoprène 0,41 mm	6,24	2,60	0,41	4,56	8,99 %
Nitrile 0,79 mm	16,75	9,72	0,57	7,39	7,71 %
Nitrile 0,61 mm	11,36	8,11	0,71	7,39	9,61 %
Caout. naturel 1,12 mm	28,40	6,55	0,23	1,70	13,53 %
Caout. naturel 0,80 mm	17,10	3,92	0,23	1,70	13,53 %

La valeur de l'élongation e de l'équation de Moore peut être réécrite comme étant $K/2\pi$. Pour représenter la résultante de la force horizontale de friction provenant du glissement et de la pénétration de la lame dans un spécimen en caoutchouc, l'équation suivante est proposée :

$$F_f = \mu_n F_N + E\, e\, A_c = \mu_n F_N + K\frac{E}{2\pi} A_c \qquad (2.16)$$

où K est environ à 0,5 pour les caoutchoucs chargés et à 0,8 pour le caoutchouc naturel. L'équation 2.16 peut être vérifiée par les résultats des essais de coupure avec le tissu de satin en fibre de verre et avec les échantillons en caoutchoucs prétendus. Au Tableau 2.5 sont présentés les valeurs des forces d'adhérence, qui ont été calculées en utilisant l'équation 2.16, et du rapport entre les forces horizontales de frottement et les charges normales appliquées.

Lors de la coupure du tissu de satin de fibre de verre (voir figure 2.21), la force normale appliquée est concentrée presque exclusivement au bout de la lame, alors que la pression aux deux côtés de la lame est presque zéro. Ceci aura comme résultat que le premier terme $\mu_n F_N$ de l'équation 2.16 sera presque égal à zéro. D'autre part, lors des essais réalisés sur les échantillons prétendus du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur (voir figure 2.23), le matériau se rétracte juste après la coupure. Puisque dans ce cas l'effet de friction résultant de l'adhérence lame-matériau a été éliminé, le deuxième terme $K\frac{E}{2\pi} A_c$ devient presque égal à zéro.

Tableau 2.5 Valeurs théoriques et expérimentales de la force d'adhérence pour les différents types de caoutchoucs

Matériau	A_c (mm^2)	K	Valeurs théoriques (équation 2.16)		Résultats expérimentaux	
			$\tau = K\frac{E}{2\pi}$ (N/mm^2)	F_{adh} (N)	F_{adh} (Fig. 2.19 et 2.20) (N)	F_{adh} / A_c (N/mm^2)
Néoprène 1,57 mm	47,34	0,50	0,36	17,18	13,96	0,30
Néoprène 0,79 mm	16,75	0,50	0,36	6,08	6,15	0,37
Néoprène 0,41 mm	6,24	0,50	0,36	2,26	2,60	0,41
Nitrile 0,79 mm	16,75	0,50	0,70	11,82	9,72	0,57
Nitrile 0,61 mm	11,36	0,50	0,70	8,02	8,11	0,71
Caout. nat. 1,12 mm	28,40	0,80	0,22	6,15	6.55	0,23
Caout. nat. 0,80 mm	17,10	0,80	0,22	3,63	3,92	0,23

Les résultats présentés au Tableau 2.5 nous montrent que les calculs théoriques suivant l'approche sur le mécanisme de coupure proposée dans cette étude, se comparent très bien avec les résultats expérimentaux.

Vu l'importance de l'effet de friction sur la résistance à la coupure pour les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des gants de protection, mis en évidence dans cette recherche, il est nécessaire de vérifier leur impact sur la résistance à la coupure des matériaux lorsqu'ils sont utilisés. Il est un fait que lorsque les gants de protection sont portés, les matériaux sont déformés, étirés ou bien contaminés. Nous allons présenter brièvement quelques résultats des études réalisées à cet effet dans les sections qui suivent.

2.3.3 *Effet de précontrainte des matériaux sur la résistance à la coupure*

Nous avons appelé précontrainte, la déformation contrôlée des matériaux préalable à la réalisation d'un essai de coupure. Cette précontrainte peut correspondre à la déformation des matériaux lors de l'utilisation des gants de protection.

Pour ce type d'essai, le matériau a été étiré à un pourcentage de déformation contrôlée à l'aide de l'appareil MTS pour ensuite l'installer sur un porte-échantillon et le retenir à l'aide des colliers de fixation. Ce type de porte-échantillon a été décrit dans un rapport précédent de l'IRSST[22]. Par la suite, le test de résistance à la coupure a été réalisé de façon standard. Des exemples des résultats obtenus sont présentés à la figure 2.22.

Figure 2.23 Effet du pourcentage de déformation sur la force horizontale pour du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur

Dans la figure 2.23, nous pouvons voir que la force horizontale mesurée pour le néoprène de 1,57 m d'épaisseur est fortement diminuée par rapport à celle développée sur le matériau non déformé (voir figure 2.20). Ceci entraînera une forte diminution de la résistance du matériau à la coupure, tel que montré à la figure 2.24.

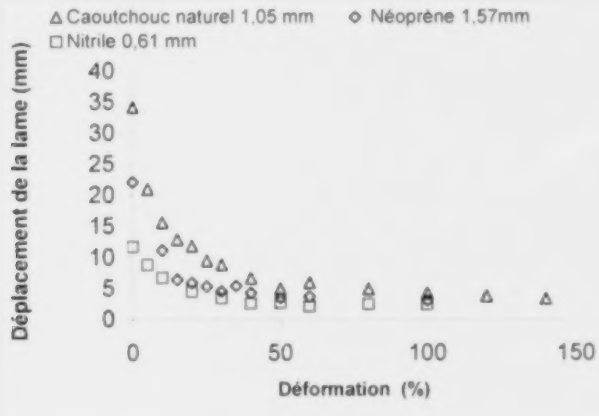


Figure 2.24 Effet du pourcentage de déformation sur le déplacement de la lame à la coupure pour une force normale appliquée de 5N pour le néoprène et de 2N pour le nitrile et le caoutchouc naturel

À la figure 2.24, nous pouvons voir que la distance parcourue par la lame pour couper le matériau avec une même charge (5N pour le néoprène de 1,57 mm d'épaisseur et 2N pour le nitrile et le caoutchouc naturel de 0,61 et 1,05 mm d'épaisseur respectivement) décroît avec le

pourcentage de déformation du matériau. Cette diminution de la distance parcourue par la lame correspond à une diminution de la résistance à la coupure des matériaux.

2.3.4 Effet de la contamination des matériaux

Puisque la résistance à la coupure est contrôlée par la friction, la résistance d'un matériau pourrait dépendre fortement de l'environnement rencontré en service. Pour ce faire, les gants ont été contaminés avec de l'huile de coupe avant le test de coupure. Les figures 2.25 et 2.26 montrent l'effet de la contamination sur des gants de néoprène et nitrile.

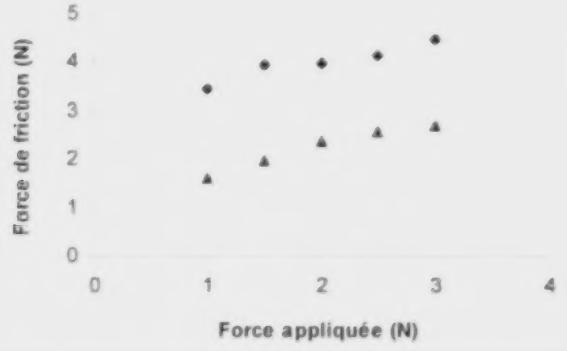


Figure 2.25 Effet de la friction sur la force horizontale pour des gants de néoprène de 0,61 mm d'épaisseur

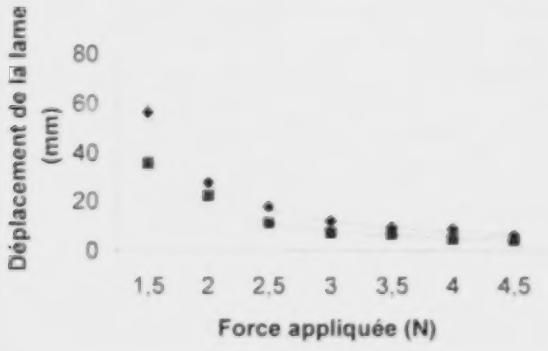


Figure 2.26 Effet de la friction sur le déplacement maximal de la lame pour des gants de nitrile de 0,61 mm d'épaisseur

On peut voir des figures 2.25 et 2.26 que l'effet de contamination du matériau par de l'huile entraîne une très forte diminution de la résistance à la coupure. Cet effet est plus prononcé lorsque la charge appliquée normale est faible. Ceci confirme encore une fois, que la résistance à la coupure dépend du frottement induit par la pression latérale de l'échantillon sur la lame.

2.3.5 *L'effet de la vitesse du déplacement de la lame sur les résultats de tests de coupure*

En étudiant l'effet viscoélastique des élastomères, Cho et Lee[10] ont prouvé que l'énergie de coupure en l'absence de friction est presque constante lorsque la vitesse de déplacement de la lame est très basse (vitesse < 10^{-5} m/s), ce qui est une condition seuil dans le processus de coupe. L'énergie augmentait abruptement à mesure que la vitesse de coupure efficace augmentait et devenait presque constante lorsque la vitesse de coupe était élevée. Ces résultats sont en accord avec les résultats que nous avons obtenus dans cette étude en utilisant la méthode d'essai de la norme ISO 13997.

Les figures 2.27 et 2.28 illustrent l'effet de la vitesse de déplacement de la lame sur le déplacement de la lame à la coupure du nitrile et du caoutchouc naturel de 0,61 mm et 0,84 mm d'épaisseur respectivement et du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur. La charge appliquée était de 2 N pour le nitrile et le caoutchouc naturel et de 5 N pour le néoprène. À température ambiante, lorsque la vitesse de la lame était dans la gamme de 1 à 100 mm/min, le déplacement de la lame, la force horizontale de friction et conséquemment l'énergie de coupure, augmentent abruptement. Cependant, elles demeuraient presque constantes lorsque la vitesse de la lame était dans la gamme de 100 à 900 mm/min.

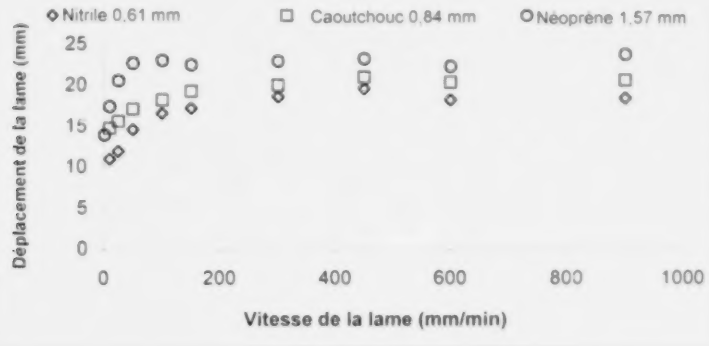


Figure 2.27 Effet de la vitesse de déplacement de la lame sur la distance à la coupure avec une force normale appliquée de 2N pour nitrile et le caoutchouc naturel et de 5N pour le néoprène

La figure 2.27 montre que la distance que doit parcourir la lame pour couper un matériau de caoutchouc augmente plus de 1,5 fois si la vitesse de la lame change de 1 à 100 mm/min. En

d'autres mots, l'énergie nécessaire pour couper ces matériaux augmente avec la vitesse de déplacement de la lame dans ces gammes de vitesses.

Les figures 2.28 et 2.29 montrent respectivement le rapport entre le déplacement de la lame et la force de friction maximale respectivement, avec la charge normale appliquée sur du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à différentes vitesses de déplacement de la lame. À vitesse réduite, l'effet de la friction due à la charge appliquée, augmente avec la vitesse de la lame. Les valeurs du coefficient de friction par contre demeurent toujours les mêmes, car les pentes des courbes reliant la force de friction à la charge appliquée pour les quatre vitesses de lame sont pratiquement identiques. D'autre part, il a été trouvé que la force horizontale F_{adh} de friction due à l'adhérence augmente de manière significative avec la vitesse. Ces résultats sont conformes à la conclusion de Cho et Lee[10] au sujet de l'effet de friction des caoutchoucs aux vitesses très basses.

Figure 2.28 Déplacement de la lame en fonction de la force normale appliquée à différentes vitesses de déplacement de la lame, sur du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur

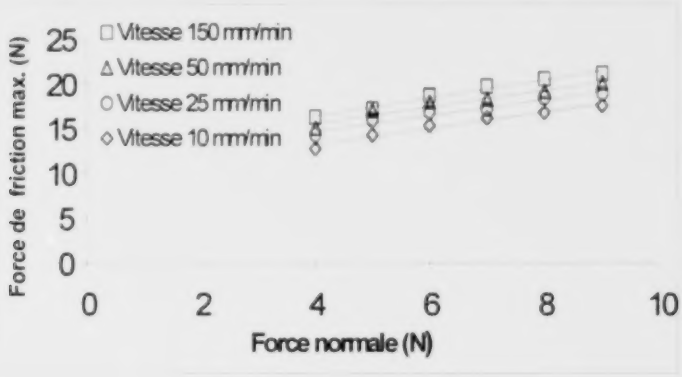


Figure 2.29 Force horizontale de friction en fonction de la force normale appliquée à différentes vitesses de déplacement de la lame, sur du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur

Comme nous l'avons indiqué auparavant, la valeur de F_{adh} dépend du nombre de liens adhésifs. D'autre part, la force des liens adhésifs est dépendante de la vitesse, ce qui semble être faible à de basses vitesses. En d'autres mots, des tests réalisés à des faibles vitesses de déplacement de la lame pourraient avoir un impact très important sur les résultats des tests de coupure. Au-delà d'une vitesse de 100 mm/min, un équilibre rupture-formation des liens s'établit, conséquemment les résultats seraient peu affectés par la vitesse de déplacement de la lame. La vitesse utilisée dans les tests normalisés ASTM et ISO pour caractériser la résistance des matériaux à la coupure qui est de 150 mm/min. À cette vitesse, les résultats ne sont pas affectés par la vitesse de la lame.

2.4 Le vieillissement des matériaux. L'effet de la température et des radiations UV sur la résistance à la coupure

2.4.1 Effet du vieillissement thermique

Les propriétés mécaniques des matériaux peuvent être affectées par l'oxydation surtout lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées. Lorsque des matériaux caoutchoucs sont exposés à des températures élevées, il peut y avoir une rupture des chaînes moléculaires, une formation de réticules tridimensionnels macromoléculaires avec durcissement du matériau ou bien une destruction des réticules[23242526]. Ces effets peuvent avoir un effet marqué sur les propriétés mécaniques des matériaux. Dans le cas du néoprène, l'effet de réticulation est le plus marqué lors du vieillissement. Les rayons UV ont un effet de catalyseur sur la dégradation par oxydation du matériau. L'énergie des rayons UV peut être suffisante pour provoquer la rupture des liens moléculaires comme par exemple, C=C, C-H ou C=O et générer des radicaux libres pouvant réagir avec l'oxygène pour initier le même type de réaction se produisant lors de l'oxydation. L'absorption des rayons UV peut provoquer soit la dégradation par oxydation ou la formation de réticules[26].

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'étude de l'effet de la température sur les propriétés mécaniques de néoprène. Des échantillons de néoprène de 1,57 mm d'épaisseur ont été exposés à différentes températures T_{ag} pour des périodes de temps différents, dans une étuve. Par la suite, les propriétés mécaniques de ces matériaux ont été caractérisées.

La figure 2.30 présente un exemple de résultat des tests d'élongation en termes de la force à la rupture en fonction de l'allongement pour des échantillons de néoprène maintenus à 140°C pendant 48 et 96 heures. Ces résultats montrent que la température a un effet significatif sur les propriétés mécaniques du néoprène. Le matériau devient plus cassant avec le temps d'exposition, comparé avec le matériau non exposé, ce qu'implique une diminution de sa capacité de déformation élastique. La résistance à la rupture décroît et conséquemment, la résistance à la déchirure aussi décroît.

Ces résultats montrent que le vieillissement thermique du néoprène cause une augmentation de la rigidité du matériau, affecte les propriétés viscoélastiques du matériau, ce qui en résulte une augmentation du coefficient de friction et de la résistance à la coupure, tel que démontré dans les figures qui suivent.

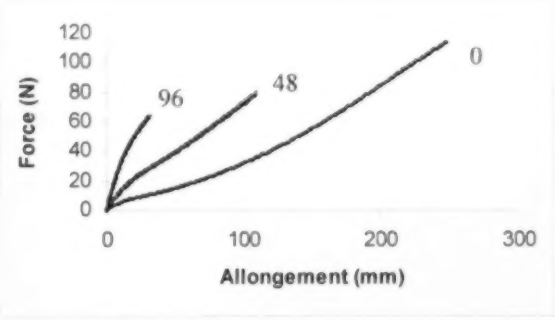


Figure 2.30 Effet de l'exposition du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à 140°C pendant 0, 48 et 96 heures sur l'allongement à la rupture

Les figures 2.31 et 2.32 illustrent l'effet du vieillissement du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur qui a été exposé à des températures entre 80 et 140 °C pendant 96 heures, sur le déplacement de la lame à la coupure et sur la force horizontale de friction. On peut voir de ces figures que le déplacement de la lame et la force horizontale de friction changent très peu entre 80 et 120 °C, indiquant que les propriétés mécaniques sont peu affectées à ces températures. Cependant à 140 °C, le déplacement de la lame à la coupure ainsi que la force horizontale augmentent d'une façon très significative. Les propriétés élastiques du néoprène sont diminuées, il devient plus cassant et le coefficient de friction augmente, ce qui cause l'augmentation de la résistance à la coupure. Normalement, le déplacement de la lame pour couper le néoprène de 1,57 mm non vieilli est d'environ 20 mm avec une force normale de 5N. Pour le même matériau vieilli à 140°C pendant 96 heures, il est nécessaire que le déplacement de la lame soit d'environ 50 mm lorsqu'une force normale de 12 N est appliquée.

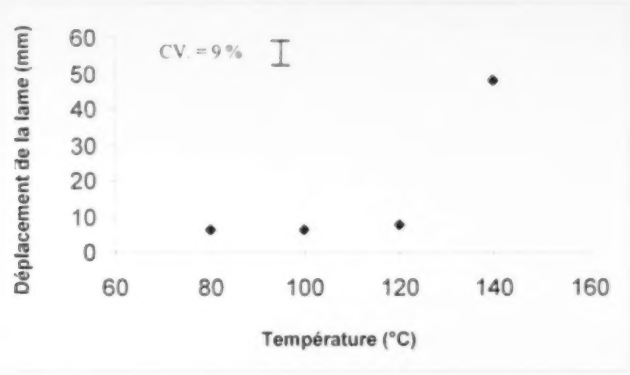


Figure 2.31 Effet de la température d'exposition pendant 96 heures du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur, sur le déplacement de la lame à la coupure pour une force normale appliquée de 12 N

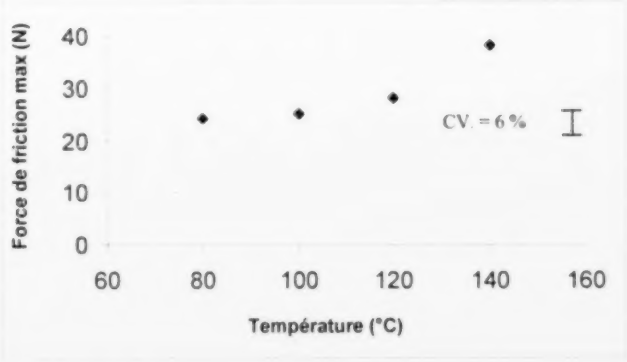


Figure 2.32 Effet de la température d'exposition pendant 96 heures du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur sur la force de friction maximale à la coupure avec une force normale de 12 N

Les figures 2.33et 2.34 présentent les résultats des tests de coupure sur du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur exposé à une température de 100 °C en fonction du temps d'exposition.

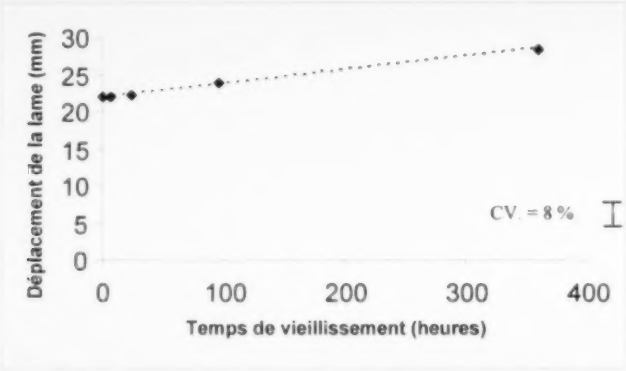


Figure 2.33 Effet du temps de vieillissement du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à 100°C sur la force de friction maximale à la coupure avec une force normale appliquée de 5N

On peut voir de ces figures que le coefficient de friction ainsi que la distance parcourue par la lame pour couper le matériau, augmentent avec le temps de vieillissement, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du matériau à la coupure. Les résultats présentés à la figure 2.33, montrent que le processus de vieillissement à 100°C est plus lent que celui observé à des températures plus élevées, l'effet est moins spectaculaire mais la tendance observée est la même, soit une augmentation de la résistance à la coupure avec le vieillissement du matériau.

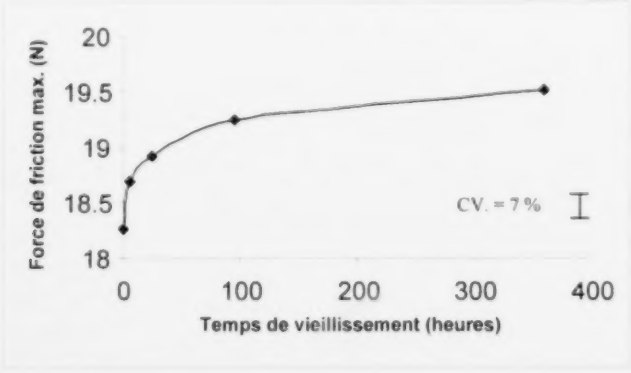


Figure 2.34 Effet du temps de vieillissement du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur à 100°C sur la force de friction maximale à la coupure pour une force normale appliquée de 5 N

2.4.2 Effet du vieillissement par des radiations UV

L'effet de l'UV sur la résistance à la coupure sur du néoprène de 1,57 et 0,41 mm d'épaisseur est présenté dans les figures 2.34 et 2.35. Les échantillons de néoprène ont été exposés à des longueurs d'onde de 300-800 nm produit par une lampe à décharge au Xénon, à une température

de 63 ± 3°C et une humidité relative de 50 ± 5 % à des temps différents jusqu'à 15 jours. Les résultats montrent que la distance parcourue par la lame pour couper les échantillons augmente avec le temps d'exposition aux UV. La force horizontale de friction augmente aussi, mais cet effet est moins remarquable. L'effet total est une augmentation de la résistance du néoprène à la coupure.

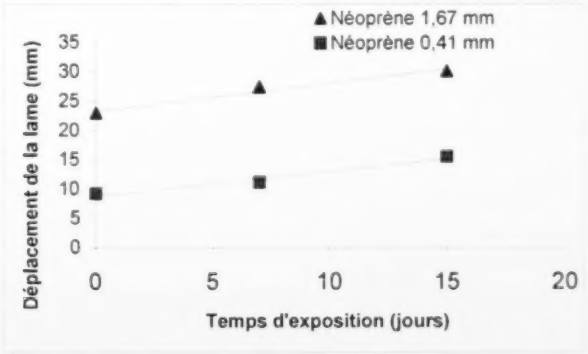


Figure 2.35 Effet du temps d'exposition à l'UV des néoprènes de 1,57 mm et 0,41 mm d'épaisseur sur le déplacement de la lame à la coupure. Les charges appliquées sont de 5 N et 2 N respectivement pour les néoprènes de 1,57 et 0,41 mm d'épaisseur

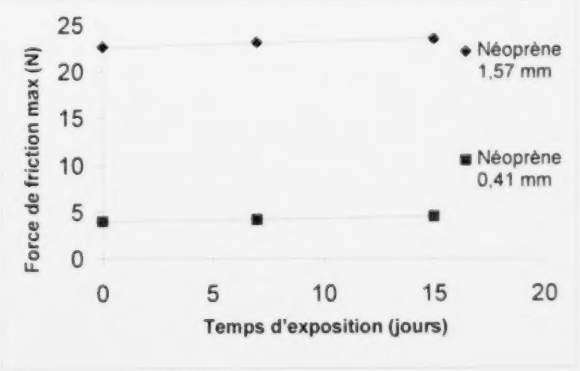


Figure 2.36 Effet du temps d'exposition à l'UV des néoprènes de 1,57 mm et 0,41 mm d'épaisseur sur la force de friction maximale à la coupure. Les charges appliquées sont de 5 N et 2 N respectivement pour les néoprènes de 1,57 et 0,41 mm d'épaisseur

2.5 Conclusion

Les résultats de cette étude démontrent l'importance de la force de friction dans le phénomène de coupure. Cette force augmente continuellement avec la distance parcourue par la lame, en raison

de la pénétration de cette dernière dans le matériau. Cet effet cause une augmentation de la force de pression latérale exercée par l'échantillon sur les deux côtés de la lame. Dans le cas des caoutchoucs néoprène, nitrile et le caoutchouc naturel, qui sont les matériaux le plus utilisés dans les gants et les vêtements de protection, cette force de pression latérale crée une force de friction beaucoup plus élevée que la force de friction créée par la force normale appliquée.

Il a été démontré que la résistance d'un matériau à la coupure en présence d'une force normale appliquée et d'un mouvement horizontal d'une lame tranchante, est fortement contrôlée par la friction entre la lame et le matériau. Une augmentation de la force de friction peut augmenter ou réduire la résistance à la coupure, dépendant de l'épaisseur, du module élastique et de la microstructure du matériau. L'énergie nécessaire pour propager une coupure comprend deux composantes. Une énergie de friction absorbée par la force de pression latérale exercée par l'échantillon sur les deux côtés de la lame et une énergie essentielle dépensée dans la coupure du matériau. Ces énergies ont des effets opposés sur la résistance à la coupure du matériau. Une augmentation de l'énergie absorbée dans le frottement augmente la résistance à la coupure. Par contre, une augmentation de la friction au bord tranchant de la lame réduit la résistance à la coupure du matériau.

Il a aussi été démontré dans cette étude que l'énergie nécessaire pour casser les chaînes moléculaires C-C des caoutchoucs est faible, environ 0,78 mJ/mm^2, alors qu'une grande partie de l'énergie utilisée pour la coupure est absorbée par la friction lame-matériau. Par conséquent, une augmentation de la friction peut augmenter la résistance des matériaux à la coupure. En utilisant la méthode d'essai mise au point à l'IRSST, il a été démontré expérimentalement que la force horizontale de friction résultante de la pénétration de la lame dans un matériel en caoutchouc a deux composantes. L'une des composantes résulte de la charge normale appliquée tandis que l'autre est reliée à l'effet d'adhérence entre la lame et le matériau. Dans la plupart des situations, la force de friction résultante de l'adhérence est beaucoup plus élevée que la force de friction provoquée par la charge normale appliquée. Dans la gamme des vitesses de lame entre 1 et 900 mm/min, la force horizontale de frottement s'est avérée être proportionnelle à la charge appliquée. La constante de proportionnalité dérivée de la relation entre la charge appliquée et la force de friction est indépendante de l'épaisseur du matériau.

L'adhérence moléculaire à la surface de contact entre la lame et le matériel dépend fortement du module de tension du matériel. Les matériaux ayant un module de tension plus élevé auront une résistance à la coupure plus élevée.

Une équation permettant de relier la force de friction horizontale mesurée par la méthode de coupure mise au point à l'IRSST à la force normale appliquée et à l'épaisseur des matériaux a été proposée (voir équation 2.26).

L'effet du vieillissement des caoutchoucs provoque un durcissement du matériau occasionné par une augmentation du module de tension avec le temps d'exposition et la température. Il en résulte une augmentation de la résistance des matériaux à la coupure.

Un autre résultat important de cette étude est que la vitesse de déplacement de la lame a un effet significatif sur des forces d'adhérence, dans la gamme des vitesses de 1 à 100 mm/min. On

observe dans cette gamme de vitesses une augmentation abrupte de l'énergie de coupure, du déplacement de lame et de la force horizontale de friction. Ceci a été interprété comme étant dû à la dépendance de la force des liens adhésifs à la vitesse de déplacement de la lame, qui est basse à de basses vitesses et augmente avec la vitesse. Cependant, dans la gamme de vitesses entre 100 à 900 mm/min, l'effet d'adhésion, le déplacement de la lame, la force de frottement et l'énergie nécessaire pour couper les matériaux ne sont pas affectés.

D'un point de vue pratique, cette recherche à permis de développer des connaissances qui permettront de développer des nouveaux matériaux de protection plus performants. Ces informations ont fait l'objet d'articles scientifiques et de présentations dans des congrès, dont notamment un atelier de travail de l'ASTM organisé à l'IRSST en 2003. Les résultats ont aussi été transmis à des fabricants de gants et de matériaux de protection via le comité F23 de l'ASTM.

Les connaissances développées dans cette recherche par rapport au phénomène de coupure nous permettent de faire quelques recommandations aux utilisateurs de gants de protection. Il est toujours vrai que les gants fabriqués dans les fibres Spectra, Dynema et Kevlar ont des propriétés intéressantes du point de vue de la résistance à la coupure ainsi qu'un très faible coefficient de friction. Cependant, lorsque ces fibres sont recouvertes d'un caoutchouc, (ex. : nitrile, polyuréthane, caoutchouc naturel ou néoprène), la contribution des forces de friction provoque une augmentation de la résistance des gants à la coupure et à la perforation. En particulier, les gants recouverts en nitrile offrent des propriétés intéressantes. Dans un prochain projet, nous allons travailler avec les fabricants de matériaux et gants de protection dans le développement de nouveaux matériaux résistant aux risques multiples.

3. ÉTUDE SUR LA PERFORATION

Nous avons déjà mentionné dans la première partie de ce rapport que la plupart des lésions aux mains survenues en milieu de travail sont des coupures et des perforations causées par la manipulation de pièces métalliques, du verre ou des outils. Environ la moitié des blessures sont des perforations causées par des objets pointus (des aiguilles surtout dans le domaine médical, des clous, des outils pointus) ou bien des objets ayant des extrémités pointues et coupantes à la fois. Ce dernier cas est le plus difficile à étudier, car il implique des sollicitations complexes sur les matériaux de protection et il fait l'objet de cette recherche. Ce problème est important car les risques le plus souvent rencontrés en milieu de travail sont multiples : des perforations, des coupures et des éraflures simultanées. En ce qui concerne seulement la perforation, il est connu présentement qu'il n'existe pas de matériau de gant de protection à l'épreuve de ce type de risque. De plus, une étude précédente réalisée à l'IRSST a démontré que les matériaux de protection ayant une bonne résistance à la perforation ne sont pas résistant à la coupure et vice-versa.

En général, les travailleurs doivent choisir les gants de protection le mieux adaptés au type de risque auquel ils sont exposés, en l'occurrence la perforation. Par conséquent, la résistance à la perforation est une des propriétés mécaniques que les matériaux des vêtements et des gants de protection ainsi que les bottes de sécurité doivent rencontrer. L'absence de matériaux adaptés oblige les travailleurs à porter plus d'un gant ou bien des gants qui sont fait de matériaux épais et rigides. Ceci cause des problèmes au niveau de la dextérité et de la fatigue musculaire.

Le domaine médical est un des secteurs dans lequel les risques de blessures ou de contamination causées par des piqûres sont importantes. Les travailleurs de la santé, autant les médecins que les infirmières et le personnel paramédical, sont exposés à des risques de blessures causées par des aiguilles de seringues contaminées. Aux États-Unis, selon les évaluations de l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), plus de 5,6 millions de personnes œuvrant dans des métiers de la santé et de la sécurité publique pourraient être exposées aux virus VIH ou de l'hépatite B. Pour se protéger, le personnel doit porter plus d'un gant, l'un par-dessus l'autre, ce qui nuit à la dextérité.

Les normes ASTM F1342[5] et ISO 13996[27] sont les méthodes les plus utilisées pour caractériser la résistance à la perforation. Ces essais ont été développés pour des matériaux minces et flexibles. La norme ASTM F1342 est conçue pour n'importe quel type de vêtements de protection, y compris les tissus enduits, laminés, textiles, plastiques, films d'élastomères ou des matériaux flexibles. Cette méthode d'essai sert à déterminer la résistance à la perforation d'un matériau en mesurant la force maximale nécessaire pour qu'une sonde de forme conique perce l'échantillon. Cet échantillon est maintenu entre deux plaques avec un trou chanfreiné d'environ 10 mm de diamètre. Bien qu'il existe des normes d'essai permettant de caractériser et de classifier la résistance à la perforation des matériaux de protection, elles ne donnent pas d'information sur les propriétés intrinsèques des matériaux. L'étude de ces propriétés est l'un des objectifs de cette étude.

En général, les informations rapportées dans la littérature technique et scientifique sont qualitatives et ne fournissent pas une compréhension fondamentale des mécanismes contrôlant la perforation[28,29,30], où ils sont seulement applicables à d'autres classes de matériaux tels que les blocs de caoutchouc[31] ou des géomembranes[32,33,34,35].

Les recherches sur les gants de protection réalisées à l'IRSST depuis 1987 ont été orientées principalement vers le développement des méthodes d'essai pour caractériser la résistance des gants à la perforation. Une étude a permis de caractériser l'influence des différents paramètres intervenant dans un test de perforation, notamment, le diamètre de la pointe, le type de géométrie et la vitesse de déplacement de la pointe[3]. Il a été démontré dans cette étude que les résultats les plus reproductibles étaient ceux obtenus avec une pointe ayant une tige de 1 mm de diamètre et une extrémité arrondie d'un rayon de 0,5 mm, qui se déplace à une vitesse de 100 mm/min. La géométrie de la pointe est facile à reproduire et les résultats sont fiables. Cette méthode a servi à évaluer la résistance à la perforation d'une centaine de gants de protection commercialement disponibles au Québec. La méthode d'essai a été adoptée par le Comité européen de normalisation (CEN) et fait partie de la norme EN 388 (Protective Gloves, Mechanical Tests and Specification). Également, le comité F-23 de l'ASTM a décidé de réviser la norme F 1342 récemment, en tenant en compte des résultats de nos travaux.

Lors des études qui ont mené au développement des méthodes de coupure et perforation, il a été démontré qu'il n'y avait pas de gants résistant aux deux types d'agresseurs. Ceci est peut être dû au fait que les mécanismes d'initiation et de propagation de rupture lors de la coupure ou de la perforation peuvent être très différents. Ces questions ont été l'objet principal de cette étude dont nous faisons état dans ce rapport.

3.1 Analyse des méthodes d'essai

Il a déjà été mentionné que la sonde de perforation utilisée dans la méthode d'essai de la norme ASTM F1342 (figure 3.1a) est très différente des objets réels (exemples à la figure 3.1 b, c et d). Par exemple, la perforation des matériaux de vêtements de protection par des aiguilles médicales a été étudiée[36]. Les résultats de cette étude ont démontré que la résistance à la perforation mesurée à l'aide des aiguilles était beaucoup plus petite que celle mesurée selon la norme ASTM F1342. De plus, dans cette étude, l'épaisseur des matériaux n'a pas été prise en considération, de sorte que les matériaux les plus épais donnent une résistance plus élevée, ce qui est une évidence, mais les paramètres intrinsèques qui contrôlent la résistance à la perforation n'ont pas été étudiés. Des études additionnelles devraient être effectuées sur des sondes de perforation qui sont représentatives des vrais objets (par exemple en utilisant des aiguilles médicales comme sondes de perforation). Des nouvelles méthodes d'essai devraient aussi être développées pour une caractérisation plus réaliste de la résistance à la perforation des matériaux de vêtements de protection.

Le but de cette partie du projet a été d'étudier les mécanismes de rupture des matériaux de protection par rapport à la perforation. L'effet de différentes géométries des sondes sur la résistance des matériaux à la perforation a été investigué en détail. Les effets de la température sur le vieillissement physique des matériaux et leur influence sur les propriétés mécaniques ont également été étudiés.

Du point de vue de la mécanique de la rupture, la perforation provoquée par des objets pointus (figure 3.1a et b) est un phénomène complexe et peut comporter une combinaison de perforation et coupure (ou déchirement) qui peuvent se produire simultanément.

Une meilleure compréhension du mécanisme de perforation sera utile pour développer des méthodes appropriées pour évaluer la résistance à la perforation, prédire la rupture des matériaux de vêtements de protection et de développer de nouveaux matériaux de protection plus résistants à la perforation.

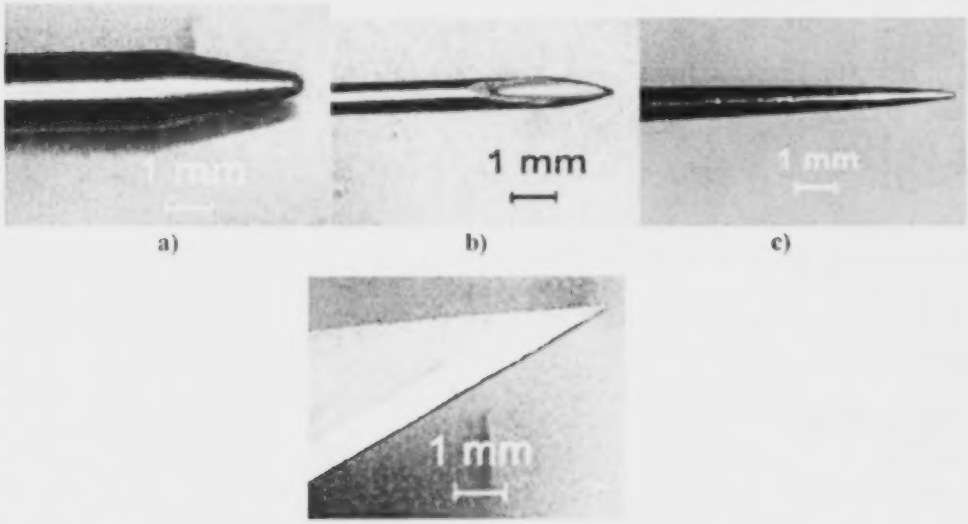


Figure 3.1 a) Sonde de perforation utilisée dans ASTM F134 ; b) Aiguille médicale; c) Aiguille à tricoter; d) Couteau avec tête pointue

3.2 Analyse préliminaire de la mécanique de rupture des polymères

La perforation, la déchirure et la coupure sont des phénomènes rencontrés par les matériaux de protection qui font appel à la mécanique de la rupture. Pendant la déformation et la rupture des polymères, les molécules glissent les unes après les autres avec rupture des liaisons secondaires. La rupture moléculaire, par la scission des liens primaires, aura lieu si l'écoulement du matériau se produit, mais ceci est restreint à la nature de la structure des polymères. Il existe plusieurs approches générales pour étudier la rupture dans les polymères.

3.2.1 Résistance théorique

En général, le phénomène de rupture d'un matériau nécessite la création d'une nouvelle surface dans sa structure. Pour les polymères, ceci se traduit par la rupture des liaisons covalentes primaires (van der Waals ou hydrogène) et/ou secondaires. Une estimation de la résistance

théorique d'un polymère solide peut être faite à l'aide de l'analyse développée par Kelly et MacMillan[37] pour n'importe quel type de solide. La résistance à la traction maximale peut être rapprochée par l'équation suivante :

$$\sigma_{th} \approx E/10 \qquad (3.1)$$

L'intérêt de la contrainte théorique σ_{th} est qu'elle donne la limite supérieure de la résistance à la traction prévue pour les matériaux. Cependant, les valeurs mesurées de cette contrainte σ_f sont beaucoup plus faibles, de l'ordre de E/100 - E/30 MPa. Il a été démontré que la faible valeur de la résistance d'un solide fragile pourrait être expliquée par la présence des défauts et des impuretés agissant comme une concentration de contrainte[37]. Cette hypothèse qui a été développée et utilisée par beaucoup de chercheurs est devenue la base de la mécanique de rupture. Elle est utilisée pour interpréter la rupture de beaucoup de solides y compris les polymères[38].

Deux approches principales sont employées dans la mécanique de la rupture bien qu'elles soient étroitement liées. La première approche est le critère d'énergie élaboré par Orowan[39] qui suppose que la rupture a lieu quand l'énergie libérée est suffisante pendant la progression de la fissure pour assurer la création de la surface de rupture. De ce fait, la rupture du matériau est caractérisée par la propriété du matériau G_c, connue sous le nom de l'énergie de déformation ou l'énergie de la rupture :

$$-\left(\frac{\partial W}{\partial A}\right)_l = G_c \qquad (3\text{-}2)$$

où W est l'énergie élastique totale du matériau et A est la surface de rupture de la fissure. La dérivée partielle indique que l'échantillon est considéré comme maintenu à une longueur constante de sorte que les forces appliquées ne se déplacent pas et par conséquent, n'effectuent aucun travail.

La deuxième approche a été développée par Irwin[40] qui a montré que le champ de contrainte au bout de la fissure pour un matériau élastique pourrait être défini uniquement par un paramètre connu sous le nom de *facteur d'intensité de contrainte K*. La rupture se produit alors quand *K* atteint une valeur critique K_c, qui est une propriété du matériau souvent appelée la ténacité à la rupture. Les paramètres G_c et K_c pour un matériau élastique linéaire sont reliés par la relation approximative suivante :

$$G_c \approx K_c^2/E \qquad (3.3)$$

Une autre approche basée sur l'analyse locale autour du bout de fissure a été développée par Thomas[41] pour les élastomères. Suivant cette approche, si la densité d'énergie de déformation moyenne au bout d'une fissure est U_t ayant un diamètre d, la relation approximative entre Gc et Ut sera représentée par l'équation suivante :

$$G_c = U_t d \qquad (3.4)$$

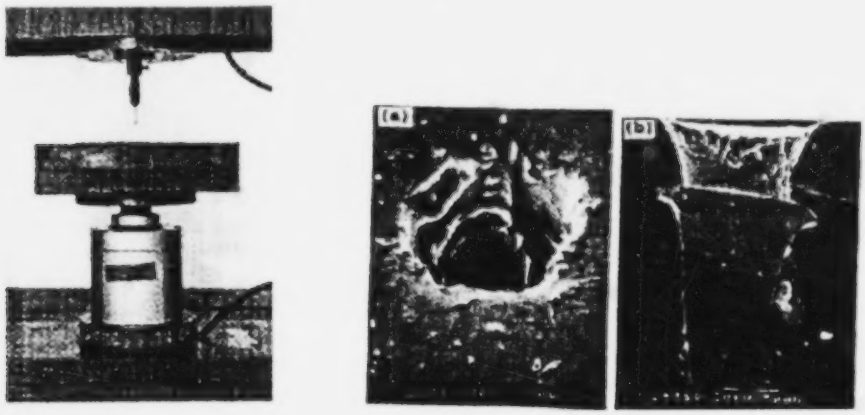
Cette dernière relation a été confirmée par des études expérimentales. La valeur de Gc est déterminée à partir de n'importe quel type d'essai. Cette valeur est indépendante des considérations géométriques et de chargement du matériau[42].

3.3 Approches rapportées dans la littérature sur la perforation de divers matériaux

La résistance à la perforation est parmi les propriétés mécaniques les plus importantes dans beaucoup de domaines, tant au niveau des matériaux de protection personnelle que dans les matériaux géotextiles. Les sections suivantes décrivent les études fondamentales rapportées sur la perforation pour divers matériaux.

3.3.1 Perforation des blocs en caoutchouc

Pour les caoutchoucs, les essais conventionnels de traction et de déchirure ne sont pas appropriés pour caractériser la résistance des échantillons de petite taille (pas assez large pour les essais de traction ou de déchirure) ou de grandes épaisseurs. Une approche alternative appropriée pour un travail de diagnostic est l'utilisation d'un essai de perforation. Dans ce cas, une sonde avec une géométrie appropriée est introduite dans le matériau et la force qui cause la rupture est mesurée à une profondeur spécifique. Une application de cette méthode est l'étude du vieillissement à travers l'épaisseur d'un bloc de matériau. Généralement, l'effet du vieillissement est plus important à de petites profondeurs, près de la surface du matériau en contact avec l'environnement (e.g. des agents oxydants).



a) Aperçu de l'essai b) Vue de dessus et de section de la fissure circulaire

Figure 3.2 Essai de perforation sur un bloc en caoutchouc

La figure 3.2a montre le montage expérimental utilisé pour ce type d'essai. La figure 3.2b montre la fissure produite par la sonde de forme cylindrique à la surface du caoutchouc. En

utilisant l'approche de la mécanique de la rupture, une équation a été dérivée pour calculer l'énergie de perforation. La force de perforation F à la rupture est reliée à l'énergie de déchirure Gc par :

$$G_c = F\frac{1-\lambda_c}{2\pi r_o} \qquad (3.5)$$

où λc est le rapport entre l'épaisseur du bloc mesure après la compression par la sonde et l'épaisseur initiale avant la compression du bloc de caoutchouc et r_o est le rayon de la surface de fissure après la rupture. Les résultats des énergies de déchirure dérivés de ce dernier essai donnent des résultats concordants à ceux obtenus par le test de déchirure de type conventionnel appelé « trouser »[10].

Cette approche qui est applicable pour des blocs en caoutchouc peut être utile pour l'étude de la perforation des matériaux de protection. On peut aussi l'utiliser pour des aiguilles de diamètres très petits par rapport à l'épaisseur de l'échantillon ou pour l'analyse de la perforation d'un échantillon en caoutchouc sur un support, dans le but de simuler les vêtements de protection lorsqu'ils sont utilisés.

3.3.2 La résistance à la perforation des géotextiles

Dans le cas des applications géotechniques, il existe un sous-domaine de recherche qui étudie le comportement des matériaux géotextiles par rapport à la perforation. Cette approche a été utilisée avec succès pour simuler, concevoir et prévoir les ruptures des matériaux. Lors de la conception des matériaux géotextiles, il est nécessaire d'évaluer leur résistance à la perforation aux objets tels que les roches ou des morceaux en bois dans des conditions quasi-statiques. Un tel essai est décrit dans la norme ASTM D1883-87 « Californie Bearing Ratio »[43]. Cazzuffi et al. ont proposé l'équation empirique suivante comme une corrélation entre la force de rupture de l'essai de CBR et la résistance à la traction selon la largeur des géotextiles isotropes et non tissés[44]

$$T_f = F_p / 2\pi r \qquad (3.6)$$

où T_f est la force de traction par unité de largeur du tissu, kN/m, et F_p est la force de perforation à la rupture en kN et r est le rayon de la sonde de perforation en mètres.

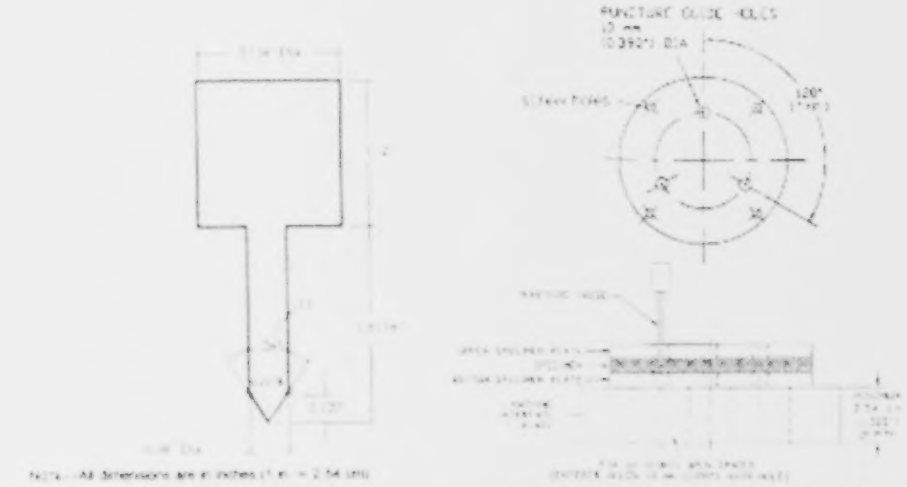
Le phénomène de perforation des géomembranes, une fois percées par les objets comme les roches ou des morceaux de bois, est différent de celui de la perforation des matériaux en caoutchouc de vêtements de protection provoqués par de petites aiguilles. Cependant, dans les cas des matériaux composites renforcés de fibres qui sont utilisés dans les vêtements de protection, les approches de perforation des géomembranes peuvent être utilisées.

3.3.3 La résistance à la perforation des matériaux de protection

Quelques travaux de recherche concernant la perforation des matériaux de vêtements de protection ont été réalisés[36,45,46]. Cependant, la plupart des informations rapportées sont qualitatives et traitent seulement de la mesure des forces nécessaires à perforer un matériau de

protection mince. Le comportement et les paramètres du matériau qui contrôlent la perforation sont toujours inconnus.

Pour caractériser la résistance à la perforation des matériaux de protection, on utilise des méthodes d'essai normalisées telles que ASTM F1342[8] et ISO 13996[27]. Ces méthodes ont été conçues pour n'importe quel type de matériau de vêtement de protection, tel que les tissus enduits ou stratifiés, les textiles, les plastiques flexibles et les élastomères. Dans le cas de la norme ASTM F1342, la résistance à la perforation est caractérisée en mesurant la force nécessaire à percer le matériau avec une sonde de perforation montrée à la figure 3.3. L'échantillon est fixé entre deux plaques; chaque plaque a trois trous chanfreinés de 10 mm de diamètre. Les espaces ouverts centrés en dessous des trous devraient être assez pour tenir compte des 25 millimètres de déplacement de la sonde (voir la figure 3.3b).



a) Section de la sonde de perforation **b) Vue de côté du support de l'échantillon**

Figure 3.3 La sonde de perforation et support d'échantillon selon la norme ASTM F1342

3.3.4 La résistance des matériaux de protection aux sollicitations complexes

Tel que dit auparavant, le type de perforation provoqué par un objet pointu et aigu à la fois (e.g. une aiguille médicale, une tête de couteau pointue) est différente de celui provoqué par une sonde conique ou cylindrique utilisée dans les méthodes d'essai existantes. Dans le cas d'un objet pointu et aigu, la perforation est un phénomène complexe et peut comporter la combinaison d'une perforation et d'une coupure (ou de déchirure) qui se produisent simultanément. Dans le cas de la caractérisation de la résistance combinée à la perforation et à la déchirure des matériaux flexibles, il existe la méthode de la norme ASTM D2582[47]. Cependant, cette méthode n'est applicable qu'à des matériaux plastiques flexibles et ne considère pas l'effet de coupure. Néanmoins, il est intéressant de la considérer dans un prochain projet dans le but de développer

une méthode pour caractériser la résistance des matériaux de protection aux sollicitations complexes.

3.4 Méthodologie de l'étude

3.4.1 Objectifs et portée de l'étude proposée

L'objectif de cette partie de l'étude était de comprendre le mécanisme et le comportement mécanique des matériaux de vêtements de protection par rapport à la résistance à la perforation avec différents types de sondes. Ceci est dans le but de trouver les propriétés intrinsèques qui gouvernent la résistance à la perforation et pour développer une corrélation analytique entre la résistance à la perforation et d'autres propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction et à la rupture. Ces informations sont nécessaires pour étudier plus tard le comportement des matériaux soumis à des sollicitations combinées lorsque perforation et coupure se produisent simultanément.

Les effets de la température, du taux de chargement et du vieillissement sur la résistance des matériaux à la perforation ont également été étudiés afin de prévoir leur comportement sous différentes conditions de travail et d'évaluer leur durée de vie utile.

3.5 Partie expérimentale

3.5.1 Les matériaux

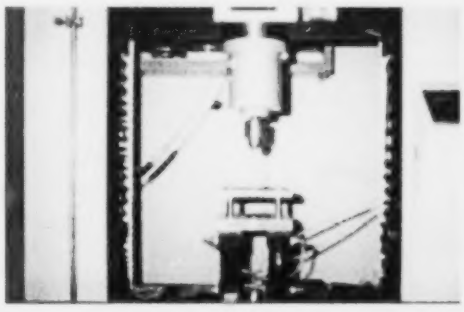
Les matériaux commerciaux communément utilisés dans les vêtements de protection et utilisés dans cette étude sont les suivants : des caoutchoucs néoprène avec diverses épaisseurs de la compagnie Fairprene Industrial Products Co., É.-U, FU, du nitrile de diverses épaisseurs coupé des gants d'Ansell Edmont Cie, Angleterre et du caoutchouc naturel des gants de Sandstrahler Cie avec diverses épaisseurs.

3.5.2 Essais de perforation

3.5.2.1 Étude sur la résistance à la perforation

La résistance des matériaux à la perforation a été caractérisée en termes de la force nécessaire à percer un matériau, du taux de déformation du matériau et de la dépendance de ces deux paramètres avec la vitesse de déformation du matériau. Les travaux réalisés par un des nôtres (Toan Vu-Khanh)[48-49,50,51] ont montré que la rupture des polymères, à la fois en déformation plane et en contrainte plane, est gouvernée par deux énergies caractéristiques reliées à l'initiation et à la propagation d'une fissure. Nous avons donc utilisé cette approche pour étudier le phénomène de perforation des matériaux de protection pour établir sa relation avec le phénomène d'initiation de la rupture. La méthode d'essai qui fait appel à une sonde de géométrie hémisphérique mise au point à l'IRSST dans l'étude précédente a été utilisée comme point de départ[3]. La sonde pour la perforation était de 1 mm de diamètre et la vitesse de déplacement de 100 mm/min. De plus, nous avons aussi caractérisé la résistance des matériaux à des vitesses allant de 1 à 100 mm/min.

Les essais de perforation ont été effectués sur le même équipement et selon la procédure d'essai développée par Lara et al.[152]. Le montage est montré à la figure 3.4. L'échantillon est tenu entre deux plaques en acier pressurisé par l'air à 0,8 MPa. Le trou de la plaque inférieure est chanfreiné pour éviter la concentration des contraintes. Les diamètres des trous du porte-échantillon qui ont été utilisés sont les suivants : Dh. = 38,0 mm et 13,5 mm.



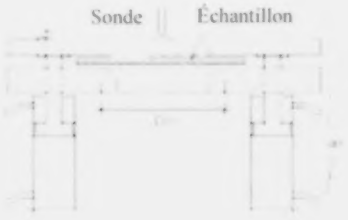


Figure 3.4 a) Montage d'essai de perforation **b) Porte-échantillon**

La sonde de perforation est maintenue dans une goupille mandrin montée dans une cellule de charge d'une machine d'essai de type Instron, qui force la sonde dans l'échantillon. La force et le déplacement vertical pendant l'essai sont enregistrés.

Trois types de sondes de perforation ont été employés : des sondes cylindriques (tête plane et arrondie), des sondes coniques (tête plane et arrondie) et des aiguilles médicales (figure 3.5). Toutes les sondes ont été fabriquées en acier inoxydable.

- Pour les sondes cylindriques, les diamètres de la tête plane de la sonde (figure 3.5a) étaient de 0,1 mm, 0,2 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 1,4 mm, et 2,5 mm. Les diamètres de la tête arrondie des sondes cylindriques (figure3.6b) étaient de 1,0 mm, de 2,5 mm et de 5,0 mm. Pour les sondes coniques avec la tête arrondie (figure 3.6c), les extrémités coniques avaient un angle de 26° et les extrémités arrondies avec un rayon de 0,25 mm, 0,30 mm et 0,50 mm respectivement;

- Les sondes coniques de tête plane (figure 3.6d) avec des angles θ au sommet égales à 13°, 30°, 45° et 60° ont été employées pour étudier l'effet de la variation des angles sur les résultats des tests de résistance à la perforation;.

- Des aiguilles médicales avec différents diamètres, 0,2 mm et 1,0 mm ont aussi été utilisées (figure 3.5e).

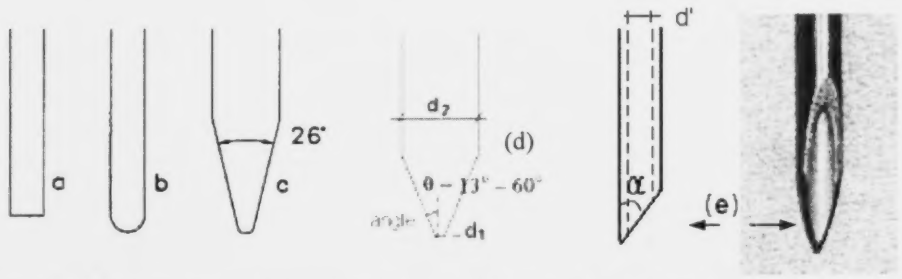


Figure 3.5 Sonde de perforation : sonde cylindrique : tête plane (a), tête arrondie (b), sonde conique : tête arrondie (c), tête plane (d) et aiguille médicale (e)

3.5.3 Essais mécaniques

3.5.3.1 Essai de déchirure

L'énergie de rupture ou l'énergie de déchirure, comme mentionnée dans la section 3.3.1, est indépendante de la géométrie de l'échantillon d'essai. La méthode d'essai « trouser » a été choisie dans cette étude parce qu'elle est particulièrement utile pour calculer l'énergie de déchirure des matériaux et donne des résultats de nature fondamentale. Cette méthode d'essai est décrite dans la référence[53] et correspond à la norme ASTM D624-91. L'échantillon d'essai de type « trouser » utilisé dans cette étude est présenté comme matrice T dans la norme ASTM (figure 3.6).

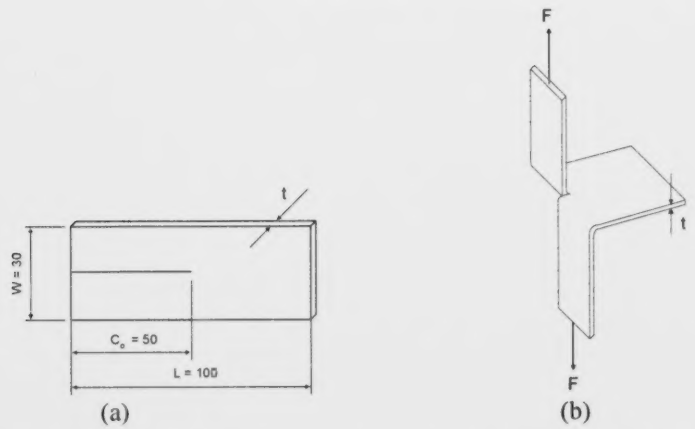


Figure 3.6 Échantillon d'essai « Trouser » : (a) État non déformé ; (b) État d'extension

3.5.3.2 Essai de traction uniaxiale

L'essai de traction uniaxiale a été utilisé pour évaluer la résistance à la traction des matériaux employés dans cette étude. La résistance à la perforation de ces mêmes matériaux a été caractérisée et les résultats seront présentés plus loin. L'essai de traction a été réalisé selon la norme ASTM D412[54] en utilisant un échantillon de type C « dog-bone ». L'essai a été effectué à la température ambiante, avec une vitesse de 100 mm/min. L'élongation a été mesurée à l'aide d'un extensomètre laser de type MTS LX 500 comme montré sur la figure 3.7.

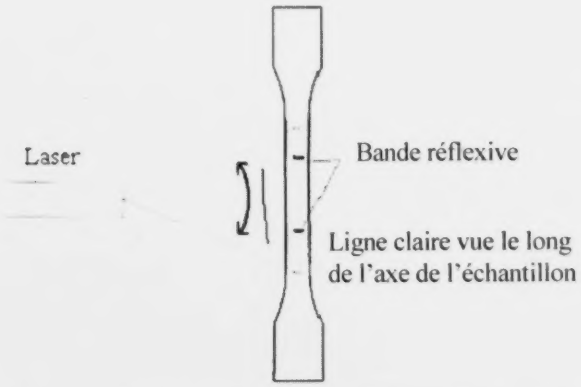


Figure 3.7 Élongation mesurée par l'extensomètre laser

3.5.3.3 Essai de traction biaxiale (essai de ballon)

La déformation produite dans un essai de perforation avec une sonde d'extrémité arrondie se rapproche à celle obtenue lors d'un essai biaxial plutôt qu'un essai uniaxial. Par conséquent, les essais de ballon ont été effectués pour déterminer la déformation et la contrainte à la rupture dans un état équibiaxial (figure 3.8). La pression est contrôlée par une jauge de pression. Le diamètre maximal du ballon avant l'éclatement a été enregistré avec l'extensomètre laser MTS LX 500.

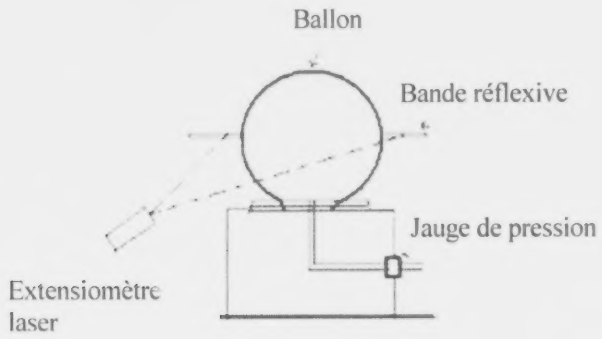


Figure 3.8 Schéma de l'essai de Ballon (équibiaxial) - et de l'équipement de mesure

La déformation et la contrainte ont été calculées par les relations suivantes[55,56] :

$$e = \lambda - 1$$
$$\sigma_e = RP/2t \qquad (3.7)$$

où σ_e est la contrainte d'ingénieur

λ est le rapport d'élongation, $\lambda^2 = S_{ball}/S_0$

R est le rayon maximum du ballon à l'éclat, P est la pression maximale, t est l'épaisseur initiale, S_{ball} est la surface maximale du ballon à l'éclat et S_0 est la surface initiale de l'échantillon.

La déformation et la contrainte réelle sont représentées par les équations suivantes :

$$\varepsilon = \ln(e + 1) = \ln\lambda$$
$$\sigma = \lambda^2\sigma_e = \lambda^2 RP/2t \qquad (3.8)$$

3.6 RÉSULTATS

3.6.1 Résistances à la perforation

La figure 3.9 montre des courbes typiques de la force versus le déplacement vertical enregistré pendant les essais de perforation. Les tests ont été réalisés à température ambiante (23 °C) avec une vitesse de déplacement de la sonde de 100 mm/min. Ces courbes montrent une force maximale F à la rupture du matériau et un déplacement vertical maximal H au moment de la perforation.

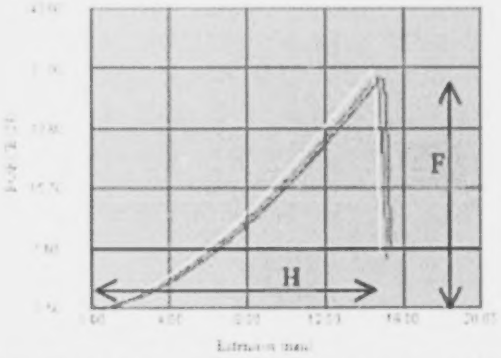
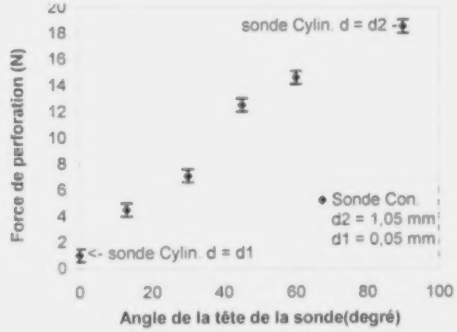


Figure 3.9 Exemple typique des résultats des tests de perforation – Déplacement vertical pour le nitrile de 0,30 mm d'épaisseur

3.6.1.1 Test de perforation avec des sondes coniques

Quatre sondes coniques avec un diamètre de la tige d_2 = 1,05 mm et avec un diamètre au sommet d_1 = 0,05 mm, avec des angles θ égale à 13°, 30°, 45° et 60° (voir figures 3.5d et 3.10) ont été utilisées. De plus, deux sondes cylindriques de diamètres 0,05 mm et 1,05 mm correspondant aux angles θ égale à 0° et 90° respectivement ont également été utilisées pour cette série de tests.

La figure 3.10 montre l'effet de l'angle au sommet de la sonde conique sur la résistance à la perforation d'une feuille du néoprène d'épaisseur t = 0,78 mm. Cette figure est le résumé des valeurs moyennes des tests réalisés avec six sondes différentes avec des angles variant de 0^0 à 90^0 avec au moins dix tests par sonde.



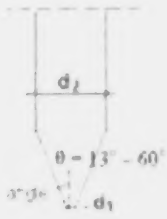


Figure 3.10 Dépendance de l'angle au sommet de la sonde par rapport à la force de perforation pour une sonde conique avec du néoprène 0,78 mm d'épaisseur. (Les sondes cylindriques correspondent aux cas de θ = 0° et θ = 90°)

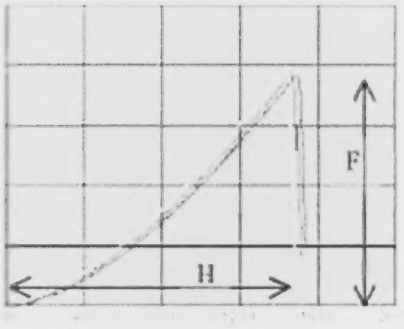


Figure 3.9 Exemple typique des résultats des tests de perforation – Déplacement vertical pour le nitrile de 0,30 mm d'épaisseur

3.6.1.1 Test de perforation avec des sondes coniques

Quatre sondes coniques avec un diamètre de la tige d_2 = 1,05 mm et avec un diamètre au sommet d_1 = 0,05 mm, avec des angles θ égale à 13°, 30°, 45° et 60° (voir figures 3.5d et 3.10) ont été utilisées. De plus, deux sondes cylindriques de diamètres 0,05 mm et 1,05 mm correspondant aux angles θ égale à 0° et 90° respectivement ont également été utilisées pour cette série de tests.

La figure 3.10 montre l'effet de l'angle au sommet de la sonde conique sur la résistance à la perforation d'une feuille du néoprène d'épaisseur t = 0,78 mm. Cette figure est le résumé des valeurs moyennes des tests réalisés avec six sondes différentes avec des angles variant de 0^0 à 90^0 avec au moins dix tests par sonde.

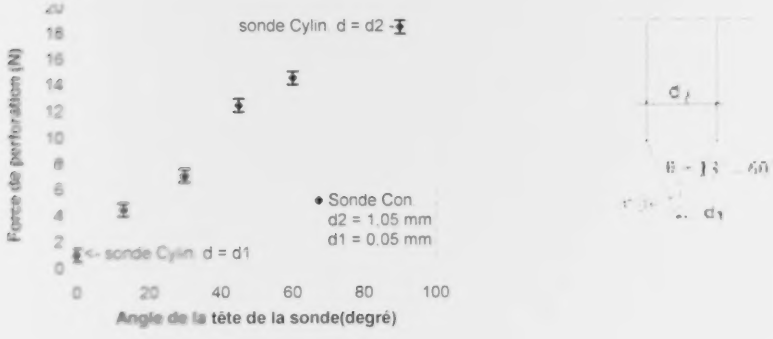


Figure 3.10 Dépendance de l'angle au sommet de la sonde par rapport à la force de perforation pour une sonde conique avec du néoprène 0,78 mm d'épaisseur. (Les sondes cylindriques correspondent aux cas de θ = 0° et θ = 90°)

Les résultats montrent que la force à la perforation augmente d'une façon presque linéaire avec l'angle au sommet de la sonde. De plus, ces résultats montrent que, dans les limites de l'erreur expérimentale, les forces maximales de perforation obtenues avec les sondes cylindriques coïncident avec la courbe des résultats obtenus avec les sondes coniques. Ces résultats suggèrent que la résistance à la perforation des membranes en élastomère à une sonde conique peut être déterminée à partir de tests réalisés avec les sondes cylindriques correspondantes. En d'autres mots, il n'est pas nécessaire d'utiliser des sondes coniques, qui sont difficiles à fabriquer, pour caractériser la résistance à la perforation des matériaux de protection.

3.6.1.2 Test de perforation avec des sondes cylindriques à tête plane

Afin de déterminer les paramètres intrinsèques du matériau lors de la perforation, nous avons utilisé des sondes cylindriques avec une tête plane avec différents diamètres. À la figure 3.11 sont présentés les résultats des tests de perforation avec du néoprène de trois épaisseurs, 0,40 mm, 0,78 mm et 1,57 mm, obtenus avec différents diamètres de sondes. Ces résultats ont été normalisés en divisant par l'épaisseur du matériau.

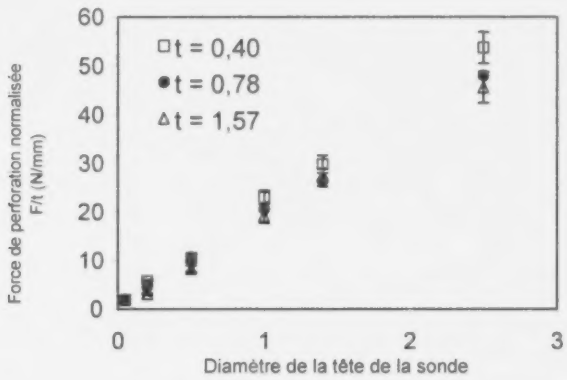


Figure 3.11 Force de perforation normalisée en fonction du diamètre de la tête de la sonde pour différentes épaisseurs (t) du néoprène (sonde cylindrique avec tête plane)

Lors d'une étude précédente, il a été démontré que pour un même type de matériau mais de différentes épaisseurs, il existait une relation linéaire entre la force à la perforation et l'épaisseur du matériau, pour un même type de sonde[3]. Il est donc possible de présenter les résultats à la figure 3.12 en termes de la force maximale normalisée F/t en fonction du diamètre au sommet de la sonde pour les films de néoprène avec trois épaisseurs différentes. On peut voir dans cette figure que la force maximale de perforation est proportionnelle au diamètre de la sonde.

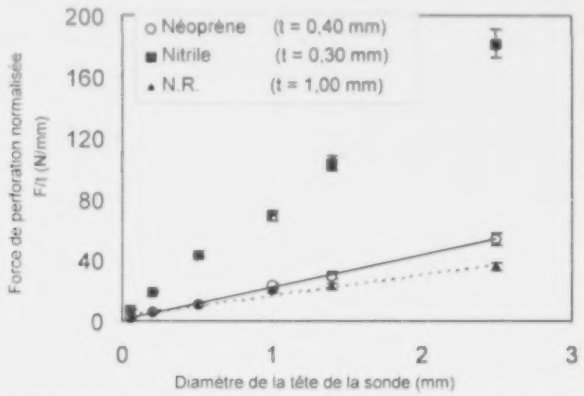


Figure 3.12 Relation entre la force de perforation normalisée (F/t) et le diamètre de la tête de la sonde

Les mesures sur d'autres élastomères, représentées sur la figure 3.12, confirment la même corrélation. Ces résultats suggèrent donc que le comportement de la perforation des élastomères peut être contrôlé par le même paramètre du matériau comme celui utilisé pour les membranes en géotextile. La résistance à la perforation des géotextiles dépend de la résistance à la traction et est représentée par l'équation suivante :

$$T_f = F_p / 2\pi r \qquad (3.9)$$

où T_f est la résistance à la traction par unité de largeur du tissu (kN/m), F_p est la force de perforation (kN) et r est le rayon de la sonde de perforation (m).

Afin de mesurer les déformations de la membrane pendant la perforation, un réseau croisé de pas de 0.5 mm a été imprimé sur la surface de la membrane. Par la suite, des photographies ont été prises lors de la déformation de ce dernier. Les observations des déformations de l'échantillon avant la perforation ont montré que la tête de la sonde utilisée et la membrane en caoutchouc adhèrent à la partie cylindrique de la sonde à une distance spécifique de la tête, comme montré sur la figure 3.13a.

Sur la surface supérieure de la sonde cylindrique, la déformation est maximale et elle est dans un état équibiaxial (figure 3.13b). À l'aide des lignes du réseau croisé qui sont imprimées sur la surface d'élastomère, nous avons mesuré la déformation maximale. La contrainte est déduite par la relation contrainte-déformation pour un état équibiaxial[41,57]. Lors de la perforation du matériau, la contrainte à la rupture est déduite en connaissant la déformation à la rupture du matériau.

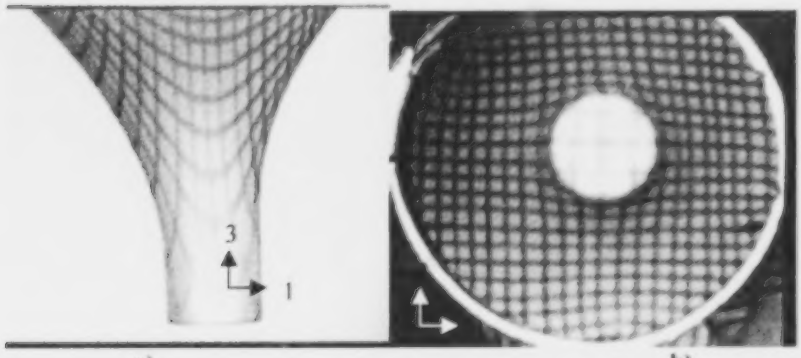


Figure 3.13 a) Déformation de l'échantillon autour de la sonde à tête plane ; b) Déformation à tête plane ($e_1 = e_2$) (matériau : nitrile, tête de la sonde : d = 2,5 mm)

Le tableau 3.1 montre la comparaison entre les forces de traction et de perforation mesurées pour différents élastomères. La force de perforation semble être beaucoup plus petite que celle mesurée par les essais de traction. Puisque la perforation nécessite un état de contrainte biaxial, il est approprié de vérifier si les disparités dans les résultats peuvent être dues à l'effet de contrainte biaxiale. Pour déterminer la résistance équibiaxiale maximale, les membranes d'élastomère ont été gonflées par l'air jusqu'à l'éclat. La procédure expérimentale et le calcul de contrainte –déformation ont été décrits dans la section 3.5.3.3.

Tableau 3.1 Comparaison de la contrainte à la rupture, la contrainte de traction uniaxiale et biaxiale comparées aux résultats des tests de perforation (entre parenthèses : déviation standard)

Matériau		Nitrile	Néoprène	Caoutchouc naturel
Contrainte d'ingénieur à la rupture (MPa)	Traction	41(4)	15 *(2)*	30 (3)
	Biaxial	80 (7)	26 (3)	54 (6)
	Perforation	55 (7)	18 (2)	25 *(3)*
Contrainte réelle à la rupture (MPa)	Traction	210 *(22)*	71 *(7)*	325 *(31)*
	Biaxial	270 *(29)*	73 *(9)*	317 *(35)*
	Perforation	128 *(18)*	45 *(7)*	104 *(11)*

Tableau 3.2 Déformation d'ingénieur à la rupture et la déformation réelle en traction et biaxial comparées aux résultats des tests de perforation (entre parenthèses : déviation standard)

Matériau		Nitrile	Néoprène	Caoutchouc naturel
Déformation d'ingénieur à la rupture (%)	Traction	410 (22)	376 (18)	971 (51)
	Biaxial	239 (17)	186 (16)	493 (42)
	Perforation	132 (11)	146 *(7)*	318 *(23)*
Déformation réelle à la rupture (%)	Traction	163 *(10)*	156 *(8)*	237 *(14)*
	Biaxial	122 *(9)*	105 *(9)*	178 *(15)*
	Perforation	84 *(8)*	90 *(5)*	143 *(12)*

Le tableau 3.2 montre la comparaison entre les résultats de la déformation maximale obtenus par des essais de perforation (présentés de la figure 3.13), de traction et équibiaxiale. Les résultats suggèrent que la perforation soit gouvernée par la déformation locale intrinsèque (déformation maximale) qui est une caractéristique du matériau, et elle est indépendante de l'épaisseur de l'échantillon et du diamètre de la sonde. La déformation de perforation à la rupture est plus petite que celle de la traction équibiaxiale, ceci explique pourquoi la contrainte de perforation est beaucoup plus petite que la résistance à la traction uniaxiale et équibiaxiale.

Il est intéressant de noter qu'après la perforation, on observe toujours un trou dans la membrane avec un diamètre spécifique et une petite pièce circulaire correspondante s'est coupée de la membrane en caoutchouc. Ces pièces sont montrées à la figure 3.14.

a) Néoprène b) Nitrile

Figure 3.14 Images des pièces de matériaux coupés lors des essais de perforation avec des sondes cylindriques à tête plane des différents diamètres (par microscope 20x)

Les résultats démontrent que le diamètre des disques de matériaux coupés, d_F, dépend du diamètre d de la sonde (avec $d_F < d$). D'après la déformation observée dans la figure 3.14, il est raisonnable de considérer que la perforation aurait lieu autour du bord circulaire de la sonde cylindrique. Le diamètre du disque coupé lors de la perforation du matériau (correspondant à la

déformation maximale équibiaxiale) est relié au diamètre de la sonde. Puisque la déformation est axisymétrique, les déformations ε_r radiale et tangentielle ε_t du disque coupé peuvent être calculées. Nous allons considérer que les rapports d'extension λ_r et λ_t, dans la direction radiale et tangentielle respectivement, sont donnés par :

$$\lambda_t = d/d_f \qquad (3.10)$$

$$\lambda_r = \frac{\text{périmètre de la tête de la sonde}}{\text{périmètre du disque coupe}} = \frac{\pi d}{\pi d_f} = \frac{d}{d_f} \text{ la}$$

La déformation d'ingénieur et la déformation réelle sont alors données par :

$$e_r = e_t = \lambda_t - 1 = d/d_f - 1 \qquad (3.11)$$
$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \text{Ln}\,(\lambda_t) = \text{Ln}\,(d/d_f)$$

Les diamètres des disques de matériaux coupés lors des essais de perforation ont été mesurés par microscopie optique et les résultats sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Relation entre la tête de la sonde et le diamètre du disque de coupe

Matériau	Nitrile			Néoprène		Caoutchouc naturel
d (mm)	1,00	1,40	2,50	1,40	2,50	2,50
d_f (mm)	0,43	0,60	1,10	0,55	1,05	0,60
d/d_f	2,32	2,33	2,30	2,54	2,40	4,16
e_r	1,32	1,33	1,30	1,54	1,40	3,16
ε_r	0,84	0,85	0,83	0,93	0,88	1,43

Indépendamment du diamètre de la sonde, il a été trouvé que le rapport d/df est constant pour chaque matériau et il est très proche de la déformation maximale de la membrane en élastomère, qui est mesurée à partir de la surface supérieure de la sonde.

3.6.1.3 Test de perforation avec des sondes cylindriques arrondies

Afin de vérifier si la perforation est provoquée par la concentration de contrainte proche du bord circulaire de la sonde de tête plane, des essais de perforation utilisant une sonde cylindrique avec une tête arrondie ont été réalisés. La figure 3.15 montre que la déformation de la surface supérieure est équibiaxiale (figure3.15b) et la déformation à la tête de la sonde est semblable à celle de la sonde avec la tête plane.

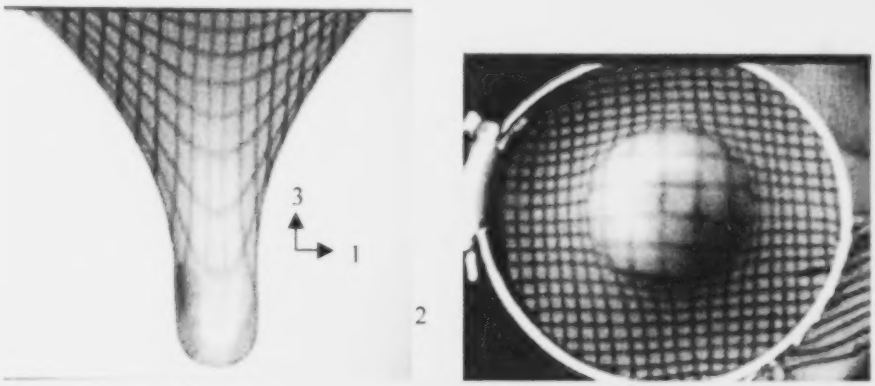


Figure 3.15 a) Déformation de l'échantillon autour de la sonde à tête arrondie; b) Déformation autour de la tête arrondie (matériau : nitrile, tête de la sonde : d = 2,5 mm)

Tableau 3.4 Comparaison des résultats d'essais avec des sondes de perforation à tête plane et arrondies de 1,0 mm de diamètre avec leurs déviations standards

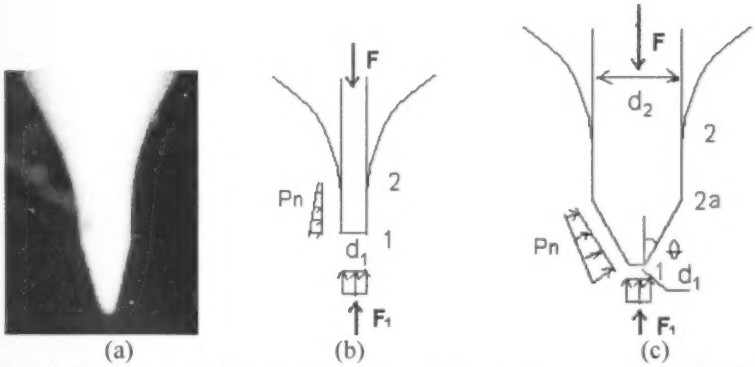
Matériau	Néoprène		Nitrile		Caoutchouc naturel	
Type de tête de la sonde	plane	arrondie	plane	arrondie	plane	arrondie
Force de perforation F_p (N)	13,5 ± 0.4	13,6 ± 0,5	21,2 ± 1,4	22,0 ± 0.9	21,0 ± 1.1	20,6 ± 1,6
Déformation maximale	1,46 ± 0,13	1,40 ± 0,17	1,32 ± 0,08	1,35 ± 0,10	3,18 ± 0,21	3,05±0,23

Le tableau 3.4 montre les résultats de la force de perforation et la déformation maximale qui sont obtenues avec les sondes cylindriques à tête plane et arrondie de 1 mm de diamètre, et pour différents matériaux utilisés dans les gants de protection tels que le néoprène, le nitrile et le caoutchouc naturel. Il est étonnant de constater que la sonde arrondie donne des résultats équivalents pour les valeurs de force à la perforation et de déformation maximale que la sonde à tête plane. Ces résultats suggèrent donc que la déformation de perforation à la rupture des membranes en élastomère n'est pas due à la concentration de contrainte autour de la tête plane. La perforation serait gouvernée plutôt par une déformation locale et intrinsèque (déformation maximale) qui est une caractéristique du matériau et elle est indépendante du diamètre et de la géométrie de la sonde, dans la fourchette des diamètres de sondes utilisées dans cette étude (de 0,1 à 2,5 millimètres).

3.6.1.4 Analyse des forces impliquées dans la perforation des matériaux

Avec les explications sur le phénomène de perforation présentées ci-dessus, on pourrait se demander pourquoi la résistance à la perforation des matériaux mesurée avec une sonde conique est toujours plus élevée que celle mesurée avec une sonde cylindrique, toutes les deux ayant le même diamètre au sommet (figure 3.16, d_1 aux figures b et c). Cette différence peut être interprétée par la façon dont les membranes en élastomères adhèrent à la tête de la sonde.

Aux figures 3.16b et c, sont présentées les différentes forces impliquées lors de la perforation des matériaux avec les sondes cylindrique et conique. La force de perforation mesurée serait la résultante de la force F_1 exercée par l'extrémité de la sonde sur le matériau (force normale), plus celle provenant de la pression Pn exercée par le matériau sur les parois de la sonde. De plus, il pourrait avoir des forces tangentielles aux parois de la sonde dues au frottement avec le matériau, lorsque la sonde se déplace. Afin de vérifier la contribution de la force tangentielle aux valeurs de force de perforation mesurées, des essais avec des têtes de sondes coniques lubrifiées ont été effectués. Les résultats des essais ont démontré que le frottement joue un rôle mineur, la force de perforation mesurée en présence du lubrifiant est légèrement réduite (< 6 %). Nous avons donc conclu que la force maximale mesurée dans des essais de perforation est le résultat de la pression normale de la membrane élastomère sur la tête de la sonde.



(a) (b) (c)

Figure 3.16 Vue de la déformation du matériau avec une sonde conique (a) et représentation schématique de la déformation d'un matériau au niveau de la tête d'une sonde cylindrique à tête plane (b) et conique (c)

L'interprétation des différences entre les résultats obtenus avec les sondes cylindriques et coniques pourrait être la suivante : lors d'un test de perforation, la force F_1 due à la pression exercée sur le matériau par la tête de la sonde est la même pour les sondes cylindrique et conique. Dans le cas de la sonde cylindrique, la pression Pn exercée par le matériau sur la zone 1-2 de la tête de la sonde (figure 3.16b) est perpendiculaire à la force F de perforation. De ce fait, elle ne contribue pas à la force de perforation et conséquemment, $F = F_1$. Dans le cas de la sonde conique, la pression Pn exercée par le matériau sur la section 1-2a de la tête de la sonde

(figure 3.16c) aurait une contribution significative à la force de perforation qui pourrait être représentée par l'équation suivante :

$$F = F_1 + F_2 \tag{3.12}$$

où F est la force de perforation avec la sonde conique, F_1 la force de perforation pour une sonde cylindrique et F_2 est la composante de la force verticale due à la pression à la surface conique de la tête de la sonde en contact avec la membrane. Cette force est représentée par :

$$F_2 = A\, p_n^{ave} \sin\theta \tag{3.13}$$

où A est l'aire de la surface conique qui est située dans la section 1-2a de la tête de la sonde montrée à la figure 3.16c, représentée par $A = \frac{\pi}{4\sin\theta}\left(d_2^2 - d_1^2\right)$ et P_n^{ave} est la pression moyenne dans la section 1-2a.

Les grandes déformations dans le cas de l'indentation des membranes élastiques circulaires en l'absence du frottement ont été théoriquement analysées[58]. Ceci a permis de calculer P_n^{ave} par la relation suivante :

$$p_n^{ave} = K_1 \bar{T}_1 + K_2 \bar{T}_2 = 4\cos\theta/(d_2 + d_1)\,\bar{T}_2 \tag{3.14}$$

où K_1 et K_2 sont les courbures principales de la membrane dans les directions méridienne et circonférentielle respectivement. Dans notre cas, $K_1 = 0$, $K_2 = 4\cos\theta/(d2 + d1)$ et T_1 et T_2 est la contrainte moyenne résultante dans la membrane par unité de longueur dans la direction du méridien et de la circonférence respectivement et T2 est donnée par :

$$\bar{T}_2 = 2C_1 h\left[\frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}_2} + \frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} - \frac{2}{\bar{\lambda}_1^{3}\bar{\lambda}_2^{3}} + \alpha\left(2\bar{\lambda}_1\bar{\lambda}_2 - \frac{1}{\bar{\lambda}_1^{3}\bar{\lambda}_2} - \frac{1}{\bar{\lambda}_2^{3}\bar{\lambda}_1}\right)\right] \tag{3.15}$$

où $\bar{\lambda}_1$ et $\bar{\lambda}_2$ sont les valeurs moyennes des rapports d'élongation de la membrane déformée dans les directions méridienne et circonférentielle, respectivement, h est l'épaisseur de la membrane non déformée et C1, C2 sont des constantes du matériau (α = C2/C1) qu'on trouve dans la fonction d'énergie de déformation du Mooney[59]. Ces constantes sont déterminées à partir des essais de traction selon la méthode normalisée ASTM D412. La fonction d'énergie de déformation de Mooney est représentée par la relation ci-dessous :

$$W(I, II) = C_1(I-3) + C_2(II-3) = C_1(I-3 + \alpha(II-3)) \tag{3.16}$$

où les invariants de déformation sont $I = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}$ et $II = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_1^2\lambda_2^2$. La valeur III $= \lambda_1\lambda_2\lambda_3$ est considérée comme étant égale à 1.

Si nous remplaçons les équations 3.14 et 3.15 dans 3.13, nous aurons :

$$F_2 = 2\pi(d_2 - d_1)\cos\theta\, C_1 h\left[\frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}_2} + \frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} - \frac{2}{\bar{\lambda}_1^3\bar{\lambda}_2^3} + \alpha\left(2\bar{\lambda}_1\bar{\lambda}_2 - \frac{1}{\bar{\lambda}_1^3\bar{\lambda}_2} - \frac{1}{\bar{\lambda}_2^3\bar{\lambda}_1}\right)\right] \qquad (3.17)$$

Les valeurs $\bar{\lambda}_1$ et $\bar{\lambda}_2$ peuvent être calculées à partir de λ_0 (l'élongation à la rupture dans le cas de la perforation est égale à $\lambda_0 = e_r + 1$, voir Tableau 3.2) en se basant sur la déformation totale de l'échantillon. Pour des sondes coniques avec un angle au sommet θ égal à 13°, d_1 = 1,0 mm et d_2 = 2,0 mm, on a : $\bar{\lambda}_1 = 0.86\lambda_0$ et $\bar{\lambda}_2 = 0.62\lambda_0$. Les forces de perforation calculées pour le nitrile et caoutchouc naturel sont montrées à la figure 3.17 et 3.18, respectivement. Ces figures montrent également des résultats d'essais avec les sondes coniques et cylindriques en fonction du diamètre d_1 de la tête de la sonde.

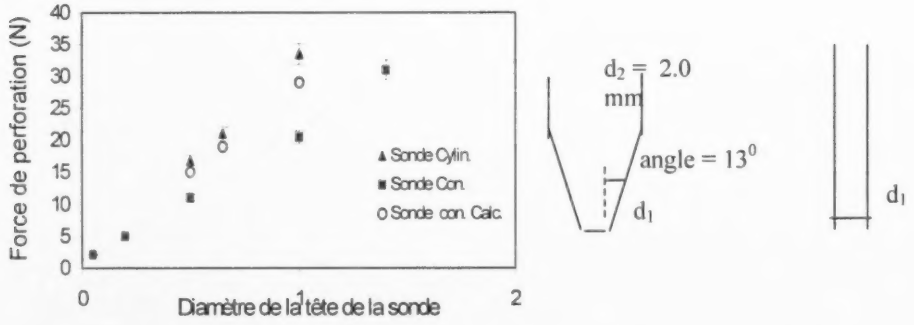


Figure 3.17 Force de perforation calculée et résultats d'essais avec des sondes coniques et cylindriques pour le nitrile (épaisseur de la membrane h = 0,3 mm, C_1 = 902 kPa, et α = 0,28)

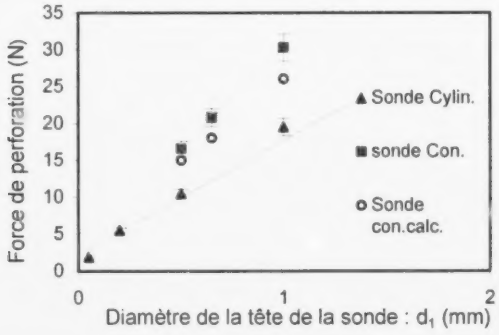


Figure 3.18 Force de perforation calculée et résultats d'essais pour des sondes coniques et cylindriques pour le caoutchouc naturel (h = 1,0 mm, C_1 = 70 kPa, α = 2,96)

Les figures 3.17 et 3.18 montrent que les forces de perforation calculées pour les sondes coniques sont plus petites que celles obtenues par des essais expérimentaux (7 % - 15 %). Une raison probable est que la fonction de Mooney est seulement précise pour des déformations de matériaux d'environ 100 %. La déformation à la rupture dans le cas de la perforation est d'environ 135 % à 320 % pour les caoutchoucs étudiés, de sorte que l'erreur dans la fonction de Mooney devient significative.

Ces résultats suggèrent que la force de perforation d'une sonde conique puisse être déterminée à partir d'une sonde cylindrique qui est beaucoup moins chère à fabriquer et à analyser. D'autre part, les sondes cylindriques fournissent une caractérisation directe de la perforation et éliminent également l'effet de la complexité de la géométrie de tête de la sonde conique.

3.6.2 *La résistance des matériaux à la perforation aux aiguilles médicales. Résultats préliminaires*

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la perforation d'un matériau provoquée par un objet réel pointu et aigu à la fois, est différente de celle produite par les sondes coniques ou cylindriques utilisées dans les essais normalisés. En effet, la résistance à la perforation mesurée avec des aiguilles médicales pointues est très inférieure à celle mesurée par la méthode normalisée ASTM F1342. Dans cette section, nous présentons des résultats préliminaires sur l'étude de la perforation des matériaux en utilisant comme sonde, des aiguilles médicales.

Nous avons déjà montré que la perforation du matériau avec une sonde conique se produit quand la déformation au voisinage de la tête de la sonde atteint la valeur à la rupture. Après la rupture, la force mesurée chute brusquement, tel qu'il a été montré à la figure. 3.9. Il a été trouvé que dans ce type d'essai, aucune fissure se produisait dans le matériau avant la perforation. Dans les cas des tests de perforation avec des aiguilles médicales par contre, la perforation se produit graduellement, au fur et à mesure que l'aiguille pénètre l'épaisseur du matériau, avec formation d'une fissure initiale à sa surface. Par la suite, la tête de l'aiguille continue à pénétrer le matériau tout en élargissant la surface de rupture, ce qui fait que la force continue d'augmenter, tel que montré à la figure 3.20a.

Lors des travaux réalisés par D. J. Hewett[36], il a défini deux types de perforation des matériaux causés par des aiguilles médicales. La première définition de perforation serait celle qui se produit lorsque la tête de l'aiguille émerge du matériau à la surface opposée à celle de l'entrée (voir figure 3.19). Dans cette étude, une feuille d'aluminium a été placée sous l'échantillon afin qu'un circuit électrique se fasse entre la feuille et la tête de l'aiguille émergeant à travers le matériau. La première crête de la force montrée dans la figure 3.20a correspond à ce point et il est représenté par F_1. Après l'apparition de la tête de l'aiguille, le reste de la tête continue de pénétrer plus profondément dans l'épaisseur de l'échantillon et élargit la surface de rupture, ce qui fait que la force continue d'augmenter. Quand la tige de l'aiguille pénètre le trou déjà perforé du matériau, la force diminue rapidement. La deuxième définition de perforation correspond donc au maximum de la force mesurée, soit F_2 à la figure 3.20a

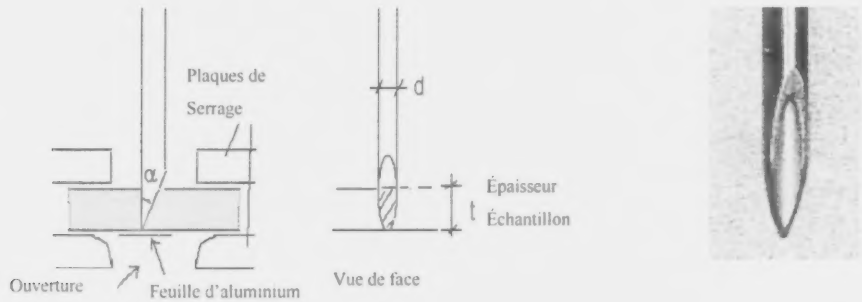
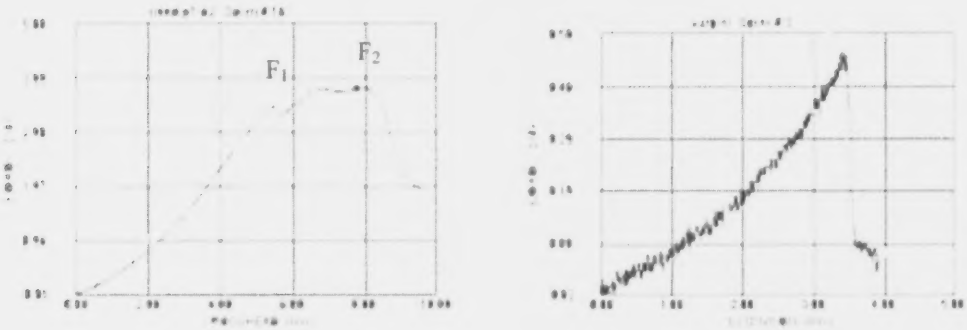


Figure 3.19 Aiguille médicale et description de la définition 1 de la perforation



a) d = 0,80 mm b) d = 0,35 mm

Figure 3.20 Force en fonction du déplacement vertical des aiguilles médicales lors d'un test de perforation (néoprène 1,57 mm d'épaisseur)

Les résultats de la force de perforation obtenus avec différents diamètres de tige d'aiguilles avec du néoprène 1,57 mm d'épaisseur, suivant les deux définitions décrites, sont présentés au Tableau 3.5. La différence entre F_1 et F_2 augmente à mesure que le diamètre de l'aiguille augmente. Généralement, F_2 est légèrement plus grande que F1, cependant, avec une petite aiguille de diamètre égale à 0,35 millimètres, F_1 est égale a F_2 (voir figure 3.20b).

Tableau 3.5 Résultats des tests de perforation du néoprène 1,57 mm d'épaisseur avec différents diamètres d'aiguilles suivant les deux définitions décrites (déviation standard en parenthèses)

Diamètre de sonde, d (mm)	0,35	0,50	0,65	0,80
F_1 (N)	1,68 (0,11)	2,05 (0,23)	2,47 (0,34)	3,34 (0,44)
F_2 (N)	1,68 (0,11)	2,11 (0,31)	2,62 (0,42)	3,10 (0,40)

Les valeurs des forces de perforation rapportées au Tableau 3.5, correspondent à la moyenne de cinq essais. Les différentes aiguilles médicales utilisées ont un angle α au sommet égal à 20°.

3.6.2.1 Dégradation de la tête de l'aiguille

Lorsqu'on utilise des aiguilles comme sonde de perforation, il pourrait avoir un effet de dégradation de la tête qui pourrait affecter les résultats de résistance à la perforation des matériaux. Par conséquent, une étude sur la dégradation des têtes d'aiguilles utilisées comme sonde de perforation, a été effectuée. Deux types d'aiguilles de diamètre de tige de 0,35 mm et 0,65 mm avec du néoprène 1,57 mm d'épaisseur, ont été utilisés.

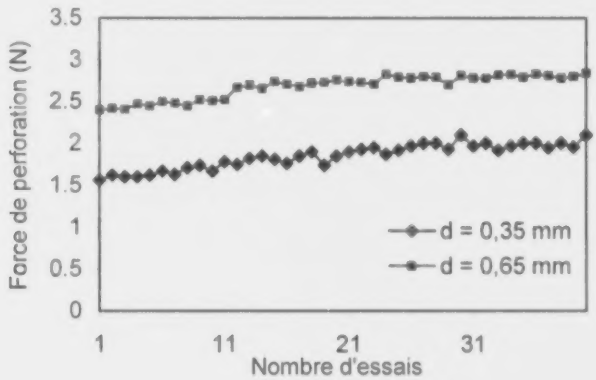


Figure 3.21 Dégradation de la tête de l'aiguille

Les résultats présentés dans la figure 3.21 montrent qu'il existe une relation linéaire entre le nombre d'essais exécutés avec la même aiguille et l'augmentation de la force de perforation (40 essais ont été réalisés pour chaque aiguille). Ceci démontre que la tête de l'aiguille se dégrade avec le nombre d'essais et que cette dégradation est semblable à celle observée avec les lames utilisées dans des essais de coupure[4]. Il est probable que dans le cas des aiguilles médicales, l'augmentation de la force de perforation serait le résultat de la dégradation de la partie tranchante des aiguilles. Cependant, l'utilisation de la même aiguille médicale comme sonde de perforation pour un nombre limité d'essais (pour 10 essais, l'erreur est < 7 %) pourrait être acceptable.

3.6.2.2 Calcul de l'énergie de rupture

L'énergie de rupture Gc est une propriété mécanique importante du matériau. Dans cette étude, une tentative a été faite pour trouver la relation entre l'énergie de rupture Gc et l'énergie de la nouvelle surface de rupture créée par la perforation d'une aiguille médicale. En utilisant l'essai de déchirure cité dans la méthode normalisée ASTM D624, l'énergie de rupture du néoprène 1,57 mm d'épaisseur a été caractérisée. La valeur de Gc obtenue est de 8,1 mJ/mm^2, avec une vitesse de déchirure qui est égale à la vitesse de perforation utilisée dans la présente étude.

Selon l'approche utilisée dans la mécanique de la rupture, l'énergie libérée pendant la fissuration d'un matériau est l'énergie nécessaire pour créer une nouvelle surface de rupture. On assume suivant cette approche, que l'énergie de déformation est transformée en énergie de création d'une nouvelle surface de rupture Gs (l'énergie de dissipation due au frottement est petite). Cette energie de surface est donnée par la relation suivante :

$$W = G_s A_1 + W_r \qquad (3.18)$$

où W est l'énergie totale de déformation avant la perforation, Wr est l'énergie emmagasinée après la perforation, qui est calculée à partir de la courbe de force-déplacement (figure 3.20) et A_1 est la surface de la rupture crée, qui est mesurée avec un microscope optique (figure 3.22).

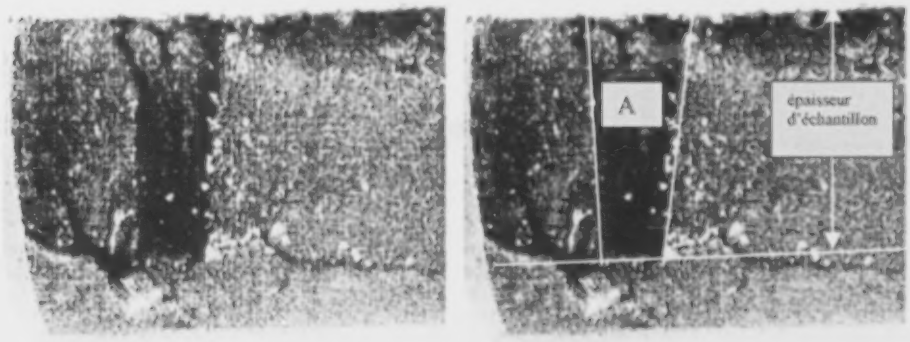


Figure 3.22 Surface de la rupture créée par une aiguille médicale sur du néoprène 1,57 mm d'épaisseur (microscopie optique 20x)

Tableau 3.6 Valeurs de l'énergie de la surface de rupture (en mJ/mm^2) créées par une aiguille médicale (valeurs d'énergie)

Diamètre d'aiguille (mm)	0,35	0,50	0,65
Épaisseur du néoprène, 0,40 mm	8,8 (1,6)	9,1 (2,2)	10,4 (2,4)
Épaisseur du néoprène, 1,57 mm	9,3 (1,9)	9,2 (2,0)	10,2 (1,8)

Les valeurs rapportées au tableau 3.6 correspondent à la moyenne de quatre essais. Les valeurs de Gs ont été calculées à partir des informations obtenues lors des essais de perforation faits avec trois aiguilles de diamètre 0,35, 0,65 et 0,80 mm sur les néoprènes de 0,40 et 1,57 mm d'épaisseur. Les résultats de ce tableau montrent que les valeurs de Gs, calculées à partir des essais de perforation sont proches de l'énergie de rupture obtenue lors d'essais de déchirure (Gc = 8,1 mJ/mm^2). Ces résultats suggèrent que la résistance à la perforation mesurée avec une aiguille médicale soit reliée à l'énergie de rupture du matériau.

Selon l'approche utilisée dans la mécanique de la rupture, l'énergie libérée pendant la fissuration d'un matériau est l'énergie nécessaire pour créer une nouvelle surface de rupture. On assume suivant cette approche, que l'énergie de déformation est transformée en énergie de création d'une nouvelle surface de rupture Gs (l'énergie de dissipation due au frottement est petite). Cette énergie de surface est donnée par la relation suivante :

$$W = G_s A_1 + W_r \qquad (3.18)$$

où W est l'énergie totale de déformation avant la perforation, Wr est l'énergie emmagasinée après la perforation, qui est calculée à partir de la courbe de force-déplacement (figure 3.20) et A_1 est la surface de la rupture crée, qui est mesurée avec un microscope optique (figure 3.22).

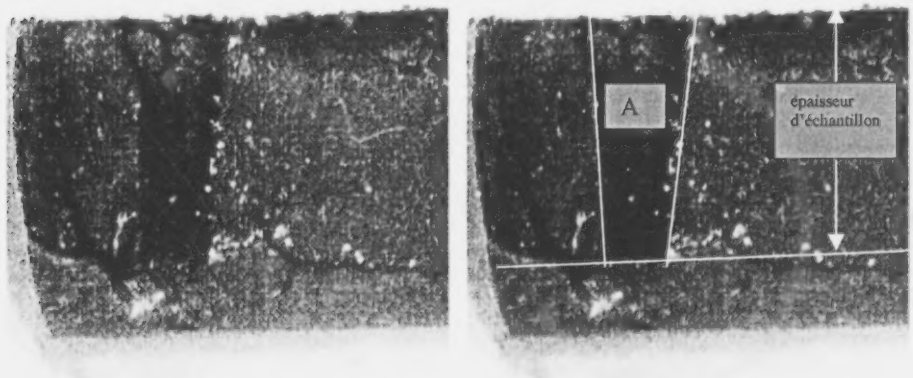


Figure 3.22 Surface de la rupture créée par une aiguille médicale sur du néoprène 1,57 mm d'épaisseur (microscopie optique 20x)

Tableau 3.6 Valeurs de l'énergie de la surface de rupture (en mJ/mm^2) créées par une aiguille médicale (valeurs d'énergie)

Diamètre d'aiguille (mm)	0,35	0,50	0,65
Épaisseur du néoprène, 0,40 mm	8,8 (1,6)	9,1 (2.2)	10,4 (2,4)
Épaisseur du néoprène, 1,57 mm	9,3 (1,9)	9,2 (2.0)	10,2 (1,8)

Les valeurs rapportées au tableau 3.6 correspondent à la moyenne de quatre essais. Les valeurs de Gs ont été calculées à partir des informations obtenues lors des essais de perforation faits avec trois aiguilles de diamètre 0,35, 0,65 et 0,80 mm sur les néoprènes de 0,40 et 1,57 mm d'épaisseur. Les résultats de ce tableau montrent que les valeurs de Gs, calculées à partir des essais de perforation sont proches de l'énergie de rupture obtenue lors d'essais de déchirure (Gc = 8,1 mJ/mm^2). Ces résultats suggèrent que la résistance à la perforation mesurée avec une aiguille médicale soit reliée à l'énergie de rupture du matériau.

Certaines études sur la coupure[60,61,62] ont établi qu'il existe une relation entre la force de coupure (ou l'énergie de coupure) et l'énergie de rupture des matériaux. Les résultats présentés dans ce rapport nous permettent de croire que la perforation avec des aiguilles médicales avec un bord coupant pourrait aussi être reliée à l'énergie de rupture des matériaux. Ces aspects seront abordés avec plus de détails lors d'une prochaine étape de cette recherche.

3.6.3 Les effets d'environnement sur la résistance à la perforation : effets du vieillissement par la température

Les matériaux utilisés dans les vêtements et les gants de protection sont fabriqués à base de polymères et peuvent être affectés par l'environnement, comme par exemple la température, les rayons UV et le taux de chargement. Nous avons déjà présenté l'effet de l'environnement sur la résistance des matériaux à la coupure. Dans cette section seront présentés les résultats de l'étude sur le vieillissement des matériaux dû à la température, et leur effet sur la résistance à la perforation avec des aiguilles médicales pour des caoutchoucs.

Nous avons déjà mentionné dans ce rapport que les caoutchoucs néoprènes exposés à des températures élevées se dégradent, deviennent graduellement durs avec perte de leurs capacités de déformation élastique. Cela conduit à une diminution de la déformation à la rupture avec une augmentation du module élastique[63].

3.6.4 Effets du vieillissement sur la perforation dans le cas d'une sonde cylindrique

Les résultats présentés précédemment montraient que la résistance à la perforation des matériaux par rapport à une sonde cylindrique était liée à la résistance à la traction et à la déformation à la rupture du matériau, ce qui nous ramène à étudier la relation existante entre la résistance à la traction d'un échantillon vieilli et sa résistance à la perforation.

Pour les caoutchoucs, certains travaux[48,64,65] ont rapporté des résultats sur la dépendance des propriétés mécaniques de matériaux, comme la résistance à la traction, la déformation à la rupture, etc., en fonction du temps de vieillissement et de la température.

L'équation d'Arrhenius nous permet de relier l'effet de la température sur les propriétés mécaniques des matériaux, de la façon suivante :

$$\varepsilon(T,t) = \varepsilon_0 \exp\left[- A_0 t \exp\left(- \frac{E}{RT} \right) \right] \qquad (3.19)$$

où ε_0 est la propriété initiale d'un échantillon non vieilli, E est l'énergie d'activation, A_0 est un coefficient à déterminer expérimentalement, T est la température absolue et R est la constante universelle des gaz parfaits dont la valeur est de 8,314 kJ/mol K.

Dans ce projet, des essais de traction ont été réalisés sur le néoprène vieilli à différentes températures variant de 120 °C à 160 °C. À partir des résultats expérimentaux et en se basant sur

l'équation 3.19, l'énergie d'activation E obtenue est de 73,85 kJ/mol avec A_0 qui est égale à $2.415 \times 10^7 s^{-1}$.

Les figures 3.23 et 3.24 montrent les résultats des essais d'élongation en traction jusqu'à la rupture du néoprène de 1,57 mm d'épaisseur vieilli à 160 °C avec différents temps de vieillissement (t). Ces figures montrent également les valeurs des essais de perforation avec les sondes cylindriques de 1,0 mm de diamètre.

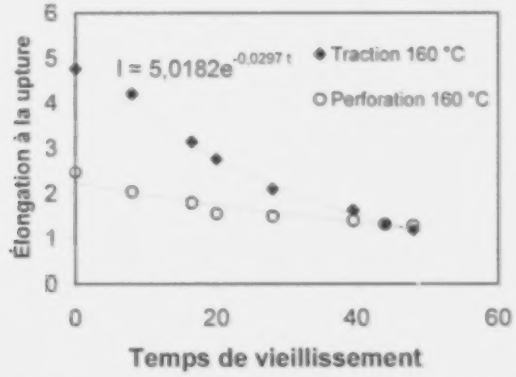


Figure 3.23 Effets du vieillissement à 160 °C sur l'élongation en traction à la rupture et sur la perforation

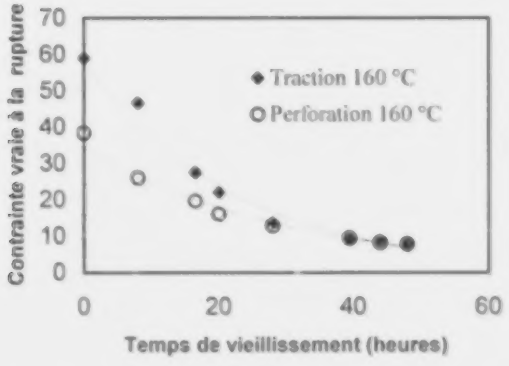


Figure 3.24 Effets du vieillissement à 160 °C sur la contrainte de traction à la rupture et sur la perforation

Les résultats démontrent que dans le cas de la perforation avec les sondes cylindriques, la déformation et la contrainte à la rupture diminuent graduellement avec le temps de vieillissement et tendent vers des valeurs obtenues par les essais de traction. Ceci est dû à la diminution de la capacité hyperélastique du caoutchouc vieilli. L'échantillon vieilli n'adhère pas à la tête de la

sonde et la déformation de perforation devient similaire à celle des matériaux moins élastiques comme les plastiques et les géomembranes (figure 3.25). Dans la section 3.3.2, il a été montré que pour les géomembranes, la déformation à la rupture en traction et à la perforation sont similaires.

Les résultats présentés dans cette section démontrent que la résistance à la perforation mesurée avec une sonde cylindrique décroît ave le temps de vieillissement du matériau à cause de la perte d'élasticité de celui-ci.

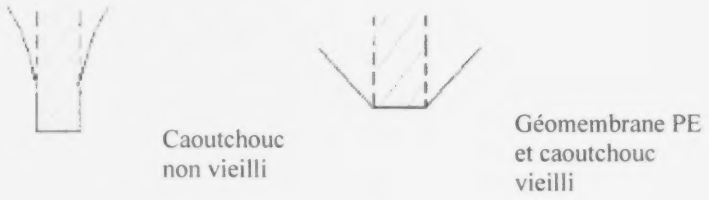


Figure 3.25 Déformations au niveau de la tête de la sonde pour différents matériaux

3.6.5 Effets du vieillissement sur la perforation mesurée avec des aiguilles médicales

Dans le travail de Tung H.A[66] sur le même néoprène utilisé dans cette étude, on a constaté que le vieillissement thermique du néoprène a généralement eu comme conséquence une augmentation du module (le néoprène devient graduellement plus dur). La figure 3.26 montre la variation du module du néoprène avec le temps de vieillissement à diverses températures.

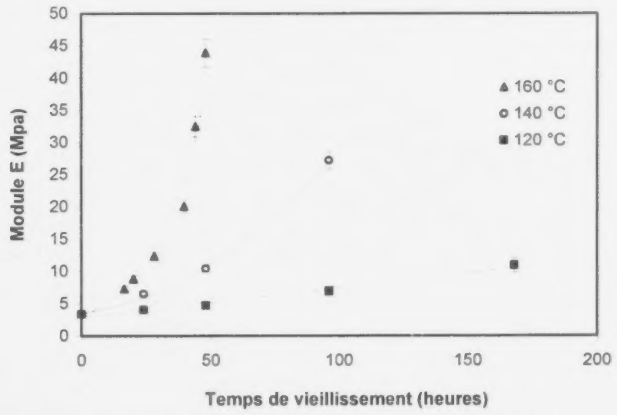


Figure 3.26 Variation du module de néoprène avec le temps de vieillissement à différentes températures de vieillissement

Comme montré précédemment, l'aiguille médicale est très pointue avec des bords coupants (voir Figure 3.19), conséquemment la perforation est susceptible d'être comme une coupure le long de l'épaisseur de l'échantillon. Dans une autre étude[67], la résistance à la coupure du caoutchouc a été trouvée proportionnelle au module de rigidité ou à la dureté du matériau. Lors du vieillissement du néoprène, il devient plus dur (augmentation du module), ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la perforation mesurée avec des aiguilles médicales. Le même type de résultat a été trouvé pour ces matériaux par rapport à la résistance à la coupure. Ce qui est le contraire de ce qui a été observé avec les sondes cylindriques et avec celles utilisées dans les tests normalisés, soit que la résistance à la perforation diminue avec le vieillissement des matériaux.

La figure 3.27 montre les résultats de perforation du néoprène vieilli obtenus avec des aiguilles médicales.

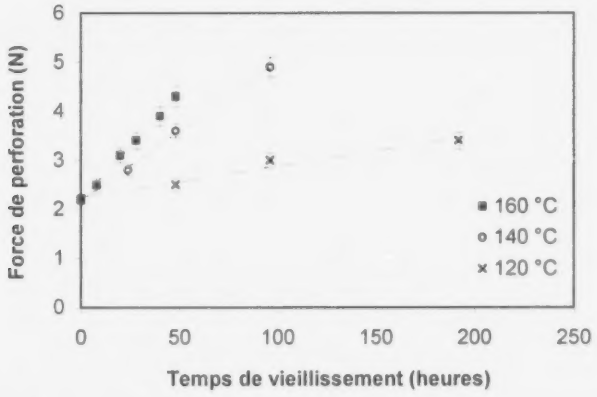


Figure 3.27 Effet du vieillissement à différentes températures sur la résistance à la perforation des aiguilles médicales d = 0.5 mm (néoprène 1.57 mm)

Les résultats présentés dans cette section confirment l'idée que l'aiguille médicale est pointue avec des bords coupants et que ce type de perforation a des ressemblances avec la coupure. De plus, nous avons établi que la perforation d'un matériau avec une aiguille médicale est liée à l'énergie de rupture. D'autres essais devront être effectués dans le futur pour montrer les effets du vieillissement sur l'énergie de rupture dans le cas de la perforation par des aiguilles médicales afin de confirmer que la perforation est reliée effectivement à la coupure des matériaux.

3.7 CONCLUSION

Dans cette partie de l'étude, il a été démontré que la géométrie de la sonde conique utilisée dans les méthodes normalisées affecte les résultats de perforation des membranes en caoutchoucs utilisés dans les gants et vêtements de protection. Une variation de l'angle de la partie conique a une influence sur les résultats de perforation. Une interprétation sur les contributions des différentes forces intervenant dans le phénomène de perforation a été présentée et validée par des résultats expérimentaux.

Il a été démontré que la force maximale de perforation dépend de la surface de contact entre la membrane d'élastomère et la tête de la sonde. La force d'indentation a été calculée pour des grandes déformations en l'absence du frottement en utilisant la fonction d'énergie de déformation de Mooney. Le calcul est conforme aux mesures expérimentales en tenant compte de la marge d'erreur de la fonction d'énergie de déformation de Mooney.

Les résultats démontrent que les sondes cylindriques fournissent une caractérisation directe de la perforation et éliminent également l'effet de la complexité de la géométrie de la tête de la sonde. Après la perforation avec les sondes cylindriques, on observe toujours un trou dans la membrane de caoutchouc ayant un diamètre spécifique et une petite pièce en forme de disque de dimension correspondant au trou est coupée de la membrane. Les diamètres des disques de matériau coupés lors des tests de perforation dépendent du diamètre de la sonde et ils sont toujours plus petits que le diamètre de l'extrémité de la sonde. Indépendamment du diamètre de la sonde, le rapport entre le diamètre du disque et le diamètre de la sonde est constant pour chaque matériau et correspond à la déformation maximale de perforation des membranes en caoutchouc.

Il a été trouvé que la résistance à la perforation mesurée avec les sondes cylindriques est beaucoup plus petite que la résistance à la traction (déformation uniaxiale) et la résistance de traction biaxiale des membranes en élastomère.

Dans le cas des sondes cylindriques à tête plane, il a été démontré que la perforation des membranes en caoutchouc n'est pas due à la concentration de contrainte autour de la tête de la sonde, comme nous l'avons supposé au départ, mais elle est gouvernée par la déformation locale qui est un paramètre intrinsèque du matériau qui est indépendant du diamètre et de la géométrie de la sonde.

L'étude sur le phénomène de perforation des matériaux avec des aiguilles médicales a démontré que dans ce cas le phénomène est complexe, impliquant une coupure et une rupture dont l'énergie est équivalente à celle de la déchirure.

Dans le cas du vieillissement des matériaux accéléré par la température, il a été démontré que la déformation à la rupture de perforation avec les sondes cylindriques, décroît graduellement et tend à correspondre à la valeur de l'essai de traction uniaxiale, ce qui est causé par la perte de la capacité hyper-élastique des caoutchoucs. La résistance des matériaux à la perforation mesurée avec les sondes cylindriques diminue avec la température et avec le temps de vieillissement. Cependant, les résultats des tests réalisés sur les mêmes matériaux vieillis avec des aiguilles médicales comme sonde de perforation démontrent que la résistance à la perforation augmente. Ces résultats sont du même type que ceux obtenus pour les mêmes matériaux vieillis par rapport à la résistance à la coupure, celle-ci augmente avec le vieillissement des matériaux. Ces résultats nous amènent à associer le phénomène de perforation par des aiguilles médicales au phénomène de coupure. Avec le vieillissement, les caoutchoucs deviennent plus durs, ce qui conduit à une augmentation de la résistance à la perforation par des aiguilles et une plus grande résistance à la coupure.

3.8 Travaux futurs

Cette recherche a permis d'étudier en profondeur les phénomènes de coupure et perforation par rapport aux matériaux les plus utilisés dans les gants et les vêtements de protection, tant du point de vue pratique que du point de vue fondamental. Le progrès réalisé nous permettra dans un deuxième temps de nous attaquer à des problèmes beaucoup plus complexes comme l'étude de la résistance des matériaux aux sollicitations simultanées coupure-perforation. Il est connu qu'il n'existe pas de matériaux résistants en même temps à la perforation et à la coupure tout en offrant une bonne dextérité. Avec la collaboration des fabricants de gants et des matériaux de protection avec qui nous avons développé des liens, nous permettra de développer des nouveaux matériaux plus performants par rapport aux risques complexes.

Dans un prochain projet, l'étude du comportement des matériaux de protection en conditions réelles d'utilisation devra être abordée :

- La caractérisation des matériaux en laboratoire se fait dans des conditions idéales, sans considérer la déformation des matériaux lorsqu'ils sont utilisés. Les résultats de cette étude ont démontré que la résistance à la coupure des caoutchoucs décroît d'une façon dramatique lorsque les matériaux sont déformés. Le comportement d'autres matériaux, en particulier les gants en fibres enduits de caoutchouc qui sont très utilisés en milieu de travail, devra être étudié;

- Les méthodes de caractérisation du comportement des matériaux vis-à-vis la perforation et la coupure devront être révisées pour refléter des situations plus près de la réalité. Par exemple, les essais de perforation sont réalisés avec un mouvement de la sonde de perforation provoquant une déformation des matériaux de protection jusqu'à la rupture à un niveau tellement élevé qu'il est inimaginable qu'il se produise le même type de déformation lors de l'utilisation d'un équipement de protection sans causer des blessures à l'utilisateur. Des travaux préliminaires visant à mettre au point un montage pour caractériser la résistance à la perforation en utilisant un support en dessous du matériau permettant de simuler l'utilisation d'un gant ou un équipement de protection ont été amorcés;

- Une méthode permettant de caractériser les sollicitations des matériaux complexes, coupures et perforations simultanées, devra être mise au point;

- Le développement des matériaux plus performants entraînera comme conséquence une plus grande durabilité des matériaux. Il faudra étudier l'effet de l'environnement (température, soleil, etc.) sur la performance et la durabilité des matériaux;

- Dans une prochaine étape les aspects reliés à l'utilisation des gants, la dextérité, la souplesse des matériaux et l'adhérence seront des informations très importantes à considérer dans le développement des nouveaux matériaux. Les informations obtenues dans les travaux réalisés parallèlement pour étudier ces paramètres seront d'une grande utilité dans la conception des nouveaux gants de protection.

4. RÉFÉRENCES

[1] Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec. Fichier sur les lésions professionnelles, mis à jour en septembre 1999, Montréal, Québec.

[2] Tellier, C., Lara, J. et Daigle, R., « La sélection et le développement des gants de protection contre les lacérations dans le secteur de la fabrication des produits en métal », Rapport IRSST, R-234, 1999.

[3] Lara, J., « Développement d'une méthode d'évaluation de la résistance à la perforation des gants de protection », Rapport IRSST, R-059, 1992.

[4] Lara, J., Turcot, D., Boutin, J. et Daigle, R., « La résistance des gants à la coupure - Développement d'une méthode d'essai », Rapport IRSST, R-103, 1995.

[5] Massé, S., Lara, J., Sirard, C. et Daigle, R., « Basic Principle Used in the Development of a New Cut-Test Apparatus for Standardization », Performance of Protective Clothing : Sixth Volume, ASTM STP 1273, p. 66-83, 1997.

[6] ISO 13997 « Protective Clothing - Mechanical Properties - Determination of Resistance to Cutting by Sharp Objects », International Standard, 1999.

[7] American Society for Testing and Materials, F 1790-04 « Standard Test Method for Measuring Cut Resistance of Materials Used in Protective Clothing », Philadelphia, PA., 2004.

[8] Norme ASTM F 1342. « Standard Test Method for Protective Clothing Material Resistance to Puncture », 2004.

[9] Lake, G.J. et Yeoh, O. H., « Measurement of Rubber Cutting Resistance in The Absence of Friction », International Journal of Fracture, vol. 14, n° 5, p. 509-526, 1978.

[10] Gent, A.N. et Chi Wang, « Cutting Resistance of Polyethylene », Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, vol. 34, p. 2231-2237, 1996.

[11] Kinwon Cho et Daeho Lee, « Viscoelastic Effects in Cutting of Elastomers by a Sharp Object », Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, vol. 36, p. 1283-1291, 1997.

[12] Payot, F., « Measurement and Control Method for Cutting Resistance of Protective Clothing », Performance of Protective Clothing: Fourth Volume, ASTM STP 1133, James P. McBriarty and Norman W. Henry, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 17-25, 1992.

[13] Turner, R.H. et Smith, D.M., « Development of a New Cut Test for Protective Gloves Against Machine-Driven Knives », Performance of Protective Clothing: Sixth Volume, ASTM STP 1273, Jeffrey O. Stull and Arthur D. Schwope, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 126-139, 1997.

[14] Kragelsky, M. N. Dobychin et S. Kombalov. « Friction and Wear », Pergamon Press, 1982.

[15] Moore, D.F., « The Friction and Lubrication of Elastomers », Oxford Pergamon Press, 1972.

[16] Schallamach, A., « The Velocity and Temperature Dependence of Rubber Friction ». Proc. Phys. Soc.B 66, p. 386-392, 1953.

[17] Persson, B.N.J., « Sliding friction », Surface Science Reports 33, p. 83-119, 1999.

[18] Persson, B.N.J., « Sliding friction - Physical Principles and Application », Springer, Heidenberg, 2000.

[19] Johnson, K.L., Kendall, K. et Roberts, A.D., Proceedings of the Royal Society of London A324, p. 313-324, 1971.

[20] Ludema, K.C. et Tabor, D., « The Friction and Visco-elastic Properties of Polymeric Solids », Wear, vol. 9, p. 329-348, 1996.

[21] Persson, B.N.J., « Theory of rubber friction and contact mechanics », J. Chem, Phys.vol. 115, n° 8, p. 3840-3861, 2001.

[22] Lara, J., Turcot, D., Daigle, R. et Massé, S., « Mise au point de méthodes d'essai pour évaluer la résistance à la perforation et à la coupure des chaussures de protection utilisées pour la lutte contres les incendies », Rapport de recherche IRSST, R-246, mai 2000.

[23] Keller, R. W., « Oxidation and ozonation of rubbers », Rubber Chemistry and Technology, vol. 58, p. 637, 1985.

[24] Kellö, V., Tkác, A. et Hrivíková, J. « A Study of the aging of Natural Rubber by Means of Infrared Spectroscopy V. Aging accelerated by Heat », Rubber Chemistry and Technology, vol. 29, p. 1245, 1956.

[25] Norling, P.M., Lee, T.C.P. et Tobolsky, A.V., « Structure and reactive in oxidation of elastomers », Rubber chem. And Tech., vol. 38, p.1998, 1965.

[26] Tkác, A. et Kellöello, V. « A Study of the aging of Natural Rubber by Means of Infrared Spectroscopy VI. Aging by Heat and Light Discussion », Rubber chem. And Tech., vol. 29, n° 4, p.1255-1265, 1956.

[27] Norme ISO 13996 « Protective clothing -- Mechanical properties -- Determination of resistance to puncture ».

[28] Murphy, V. P. et Koerner, R. M., *CBR Strength (Puncture) of Geosynthetics*, Geotechnical Testing Journal, vol. 3, p. 167-172, 1988.

[29] Narejo, D., Koerner, R. M. et Wilson-Fahmy, R. F. « *Puncture Protection of Geomembrances, Part II: Experimental* », Geosynthetics International, vol. 3, p. 629-653, 1996.

[30] Wilson-Fahmy, R.F., Narejo, D. et Koerner, R. M. « *Puncture Protection of Geomembrances, Part I: Theory* », Geosynthetics International, vol. 3, p. 605-627, 1996.

[31] Tushar, K. G., « *Puncture Resistance of Pre-Strained Geotextiles and its Relation to Uniaxial Tensile Strain at Failure* », Geotextiles and Geomembrances, vol. 16, p. 293-302, 1998.

[32] James, H. M. et Guth, E., « *Simple Presentation of Network Theory of Rubber, with a Discussion of other Theories* », Journal of Polymer Science, vol. 4, p. 153-181, 1949.

[33] Wall, F. T., « *Statistical Thermodynamics of Rubber* », Journal of Chemical Physics, vol. 11, p. 527-534, 1943.

[34] Treloar, L. R. G., « *The Physics of Rubber Elasticity* », Oxford University Press, Londres, 310 p., 1975.

[35] Gent, Alan N., « *Engineering with Rubber* », Hanser Publishers, New York, 768 p., 2001.

[36] Hewett, D.J., « *Protocol for the puncture resistance of medical glove liners* », Protective Equipment Section, National Institute for Occupational Safety and Health, USA, 37 p., 1993.

[37] Kelly, A. et Macmillan, N. H. « *Strong Solids* », 3rd ed., Clarendon press, Oxford, 212 p., 1986.

[38] Kinloch, A. J. et Young, R. J. « *Fracture behaviour of polymers* », Applied science publishers Ltd, London et New York, 496 p., 1983.

[39] Orowan, E., « Fracture and Strength of Solids », Rep. Prog. Physics, vol. 12, p. 185-232, 1949.

[40] Irwin, G. R., « Fracture Dynamics », Fracture of Metals, ASM, p. 147-165, 1948.

[41] Thomas, A.G., « *Rupture of Rubber: II. The strain concentration at an Incision* », Journal of Polymer science, vol. 17, p. 177–188, 1995.

[42] Brown, Roger P., « *Physical testing of rubber* », Chapman & Hall, London and New York, 342 p., 1996.

[43] ASTM D1883-87, « Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils ». American Society for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08, West Conshohocken, Pennsylvania.

[44] Cazzuffi, D., Cossu, R. et Lavagnolo, M.C., « Efficiency of Geotextiles and Geocomposites in Landfill Drainage Systems, Landfill of Waste: Barriers », Editors Christensen, Cossu & Stegmann, E. & FN SPON, London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne et Madras, p. 447, 1994.

[45] Leslie, L. F., Woods, J. A., Thacker, J. G., Morgan, R. F., McGregor, W. et Edlich, R. F. « *Needle puncture resistance of medical gloves, finger guards, and glove liners* », Journal of biomedical materials research, vol. 33, n° 1, p. 41-46, 1996.

[46] Salkin, J. A., Stuchin, S. A., Kummer, F. J. et Reininger, R. « *The effectiveness of cut-proof glove linears : cut and puncture resistance, dexterity, and sensibility* », Orthopedics: thorofare, vol. 18, n° 11, p. 1067–1071, 1995.

[47] ASTM D2582-00 « Standard Test Method for Puncture-Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting ».

[48] Vu-Khanh, T. « Determination of the impact fracture parameters in ductile polymers », Polymer 29, 1979-1984, 1988.

[49] Vu-Khanh, T., « Impact Fracture Characterization of Polymer with Ductile Behavior », J. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 21, p. 83-90, 1994.

[50] Vu-Khanh,T., « The Impact Fracture of Polymer: Unanswered Questions », Trends in Polymer Science, vol. 5, p. 356-360, 1997.

[51] Vu-Khanh, T. et Yu, Z., « Mechanisms of Ductile-Brittle Transition in Ductile Thermoplastic Matrix », J. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 26, p. 177-183, 1997.

[52] Lara, J., Nélisse, N., Côté, S. et Nélisse, H., « *Development of a method to evaluate the puncture resistance of protective clothing materials* », Performance of protective clothing: Fourth volume, ASTM STP 1133, James P. McBriarty and Norman W. Henry. Eds. American Society for testing and Materials, Philadelphia, p. 26-37, 1992.

[53] Hertzberg R. W., « *Deformation and fracture mechanics of engineering materials* », 4th ed., John Wiley & Sons Inc., 786 p., 1996.

[54] ASTM D412 « *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension* » Annual Book of ASTM Standards, vol. 09.01, 1998.

[55] Yamashita, Y., Kawabata, S., Takeuchi, Y. et Sakai, W. « *Biaxial Extension Strength of Carbon Black Reinforced Rubber* », Nihon Gomu Kyokaishi, vol. 67, n° 8, p. 576–583, 1994.

[56] Kawabata, S., « *Fracture and mechanical behavior of rubber-like polymers under finite deformation in biaxial stress field* », Journal of Macromolecules Sciences - Physics, vol. 8, p. 605-630.

[57] Gent, A. N., « *Engineering with rubbe* », Hanser Publishers, New York, 768 p., 2001.

[58] Yang, W. H. et Hsu, K. H., « *Indentation of a circular membrane* ». Journal of Applied Mechanics, 1971.

[59] Mooney, M., Journal of Applied Physics 11, p. 582-590, 1941.

[60] Wang, C. et Gent, A. N., « *Energy dissipation in cutting and tearing rubber* », IUPAC Polymer Symposium: Functional and High Performance Polymers, Taiwan, p. 629–631, 1994.

[61] Kilwon, C. et Daeho, L., « *Viscoelastic effects in cutting of elastomers by a sharp object* », Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, vol. 36, Issue : 8, p. 1283-1291, 1998.

[62] Gent, A. N., Lai, S.-M., Nah, C. et Wang, C., « *Viscoelastic Effects in Cutting and Tearing Rubber* », Rubber Chemistry and Technology, vol. 67, n° 4, p. 610–619, 1994.

[63] Budrugea, C., P., « *Accelerated thermal aging of NBR and other materials under air or oxygen pressures* », Die Angewandte Makromolekulare Chemie, vol. 247, p. 19–30, 1997.

[64] Schmitz, J. V. « *Testing of polymers* », Interscience Publishers, New York, 363 p., 1965.

[65] Mott, P. H. et Roland, C.M., « *Aging of natural rubber in air and seawater* », Rubber chemistry and technology, vol. 74, p. 79–88, 2000.

[66] Ha Anh, Tung Thesis: « *Effects of aging on tearing and cutting of rubber* », Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2003.

[67] Vu, T. B. Nga Thesis: « *Mechanics and mechanism of cutting of protective materials* », Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2002.